Logistische Beherrschung von Technologieänderung am Beispiel der Schmiedeindustrie

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Karim Ouali
geboren am 19.10.1976 in Reims

2009

1. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. sc. h.c. Hans-Peter Wiendahl
2. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. Georg Redeker
Tag der Promotion:	28.05.2009

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gemeinnützige GmbH.

Herrn Prof. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. sc. h.c. Dr.-Ing. Hans-Peter Wiendahl, dem ehemaligen geschäftsführenden Gesellschafter des IPH und Emeritus des IFA – Institut für Fabrikanlagen und Logistik der Leibniz Universität Hannover, gilt mein besonderer Dank für seine großzügige Unterstützung und seine wertvollen Anregungen.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens danke ich für die Übernahme des Korreferats und die eingehende Einsicht meiner Arbeit.

Ebenso danke ich Herrn. Prof. Dr.-Ing. Georg Redeker für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Weiterhin gilt mein Dank allen Kollegen am IPH. Insbesondere den Mitarbeitern der Abteilung Logistik, für ihre Kollegiale und fachliche Unterstützung.

Für die kritische Durchsicht und die konstruktiven Diskussionen danke ich besonders den Herrn Dipl.-Ing. Georg von Dömming und Dr.-Ing. Dipl.-Wi.-Ing. Patrick Holtsch.

Für die Unterstützung weit über diese Arbeit gilt mein herzlicher Dank meiner Familie. Ganz besonders danke ich meinen Eltern für die Ermöglichung meiner Ausbildung, meiner Frau Nadine für die zugestandenen Freiräume und die Aufmunterungen sowie meinem Sohn Chedy für die notwendige Ablenkung. Ihnen widme ich diese Arbeit.

Hamburg, am 29.05.2009 Karim Ouali

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

Vorwort ..... **III**

Inhaltsverzeichnis ..... **V**

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen ..... **VIII**

Kurzfassung ..... **IX**

1. Einleitung **1**

2. Ausgangssituation und Begriffserklärung **3**

2.1 Neue Technologien 3

2.1.1 Notwendigkeit zur Entwicklung neuer Technologien 3

2.1.2 Heutige Anforderungen an neue Technologien 3

2.1.3 Steigende Bedeutung der Logistik bei der Entwicklung neuer Technologien 6

2.1.4 Anforderungen an neue Technologien am Beispiel der deutschen Schmiedeindustrie 7

2.2 Beherrschung von logistischen Prozessen 9

2.2.1 Erklärung des Begriffs „Beherrschung“ 9

2.2.2 Beschreibung der Logistikziele 11

3. Stand des Wissens – vorhandene Ansätze zur Beherrschung von Technologieänderung **15**

3.1 Technologiemanagement 15

3.1.1 Grundlagen des Technologiemanagements 15

3.1.2 Prozessmodelle des Technologiemanagements zur Beherrschung der Technologieänderung 16

3.1.3 Anwendung von Lebenszyklusmodellen zur Beschreibung der Technologieänderung 19

3.1.3.1 Modell nach Arthur D. Little 19

3.1.3.2 Technologielebenszyklus nach Ford und Ryan 21

3.1.3.3 S-Kurven-Konzept nach McKinsey 22

3.1.4 Diskussion der Einsatzfelder und Anwendungen 23

3.2 Anlaufmanagement 23

3.2.1 Grundlagen des Anlaufmanagements 24

3.2.2 Anlaufmanagement zur Beherrschung neuer Technologien 25

3.2.3 Diskussion der Einsatzfelder und Anwendungen 25

3.3 Logistische Kennlinien 26

3.3.1 Grundlagen der logistischen Kennlinien 26
3.3.2 Anwendung der logistischen Kennlinien bei einer Technologieänderung 28
3.3.3 Diskussion der Einsatzfelder und Anwendungen 31
3.4 Wandlungsfähigkeit 32
3.4.1 Ansatz zur regelkreisbasierten Wandlungsfähigkeit 32
3.4.2 Bedeutung der Wandlungsfähigkeit bei einer Technologieänderung 33
3.5 Materialflusssimulation 33
3.5.1 Grundlagen der Materialflusssimulation 33
3.5.2 Materialflusssimulation zur Beherrschung neuer Technologien 35
3.5.3 Diskussion der Einsatzfelder und Anwendungen 36
3.6 Ansätze zur simultanen Betrachtung von Logistik und Technologie 39
3.6.1 Ansatz des Simultaneous Engineering 39
3.6.2 Simultane Betrachtung der Wechselwirkungen technischer und logistischer Produktionsprozesse 40

4. Aufgabenstellung 43
4.1 Ableitung des Handlungsbedarfs 43
4.2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit 44
4.3 Vorgehensweise 44

5. Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Technologie und Logistik 46
5.1 Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den PPS- und den technologischen Parametern 46
5.1.1 Analytische Ermittlung der Zusammenhänge 54
5.1.1.1 Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den technologischen Parametern und der Auftragsdurchlaufzeit mit dem eindimensionalen Durchlaufelement 55
5.1.1.2 Ermittlung der Auswirkungen des Ausschusses auf die logistischen Parameter im Fortschrittszahlendiagramm 57
5.1.2 Korrelationsanalyse logistischer und technologischer Parameter 60
5.1.2.1 Versuchsaufbau zur Analyse von Korrelationen zwischen technologischen und logistischen Parametern 61
5.1.2.2 Simulationsablauf und Diskussion der Ergebnisse 64
5.1.3 Ableitung einer Zusammenhangmatrix 68
5.2 Zusammenhänge zwischen neuen Technologien und den Parametern zur Gestaltung der Prozesskette 71
5.3 Ermittlung der logistischen Aufgaben zur Beherrschung der Technologieänderung 74
5.3.1 Charakteristika der Phasen des Technologielebenszyklus 74

5.3.1.1 Logistische Charakteristika der Entstehungsphase 76
5.3.1.2 Logistische Charakteristika der Wachstumsphase 77
5.3.1.3 Logistische Charakteristika der Reife- und Altersphase 78
5.3.2 Logistische Aufgaben entlang des Technologielebenszyklus 78
5.3.2.1 Aufgaben in der Entstehungsphase 80
5.3.2.2 Aufgaben in der Wachstumsphase 81
5.3.3 Auswirkungen der Technologie auf die Lieferkette 82

6. Methoden zur logistischen Beherrschung einer Technologieänderung 84
6.1 Simulationsbasierte Gestaltung der Prozesskette infolge einer Technologieänderung 84
6.1.1 Gestaltung der Prozesskette 84
6.1.2 Nachhaltigkeit der Prozesskette 87
6.1.2.1 Modul Zulieferer 88
6.1.2.2 Modul Produzent 89
6.1.2.3 Modul Kunde 90
6.2 Simultane logistische und technische Parameteradaptation 92
6.2.1 Einbindung der Ergebnisse aus dem Monitoring 94
6.2.2 Analyse von Ursachen 97
6.2.3 Simulationsbasierte Parameteradaptation 99
6.2.3.1 Anpassung der Parameter zur logistischen Gestaltung der Prozesskette 99
6.2.3.2 Planparameter im PPS-System 101

7. Simulationsbasiertes Werkzeug zur logistischen Beherrschung neuer Technologien 105
7.1 Anforderungen 105
7.2 Aufbau des Werkzeugs SiMPL 106
7.2.1 Technische Realisierung 107
7.2.2 Datenstruktur von SiMPL 109
7.3 Planungs- und Monitoringkomponente 111
7.4 Ausführungskomponenten 111
7.4.1 Modul Zulieferer 111
7.4.2 Produzent 112
7.4.3 Kunde 113

8. Validierungsbeispiel 115
8.1 Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung 115
8.2 Validierung der Methoden und Ergebnisdiskussion 117

8.2.1 Anwendung von SiMPL zur Gestaltung der Liefer- und Prozesskette zum Präzisionsschmieden 117
8.2.1.1 Ermittlung der Auswirkungen des Präzisionsschmiedens auf die Logistik 117
8.2.1.2 Neugestaltung der Schmiedeprozesskette 118
8.2.1.3 Logistische Auswertung der Schmiedeprozesskette 122
8.2.1.4 Neugestaltung der Lieferkette infolge der Technologieänderung 125
8.2.2 Logistische Beherrschung der Schmiedeprozesse während der Wachstumsphase 133
8.2.3 Diskussion der Ergebnisse 144
8.2.3.1 Zusammenfassung 144
8.2.3.2 Fazit 145

9. Zusammenfassung und Ausblick 147

10. Literaturverzeichnis 150

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen und Formelzeichen

Abkürzungen

AVG	Arbeitsvorgang
BKT	Betriebskalendertag
DoE	Design of Experiment
ERP	Enterprise Resource Planning
F&E	Forschung und Entwicklung
FIFO	First In First Out
KOZ	Kürzeste Operationszeit
LIFO	Last In Last Out
LTT	Liefertermintreue
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
Std	Stunde
TIM	Technologie- und Innovationsmanagement
TLZ	Technologielebenszyklus
ZDA	Auftragsdurchlaufzeit
ZDL	Durchlaufzeit

Kurzfassung

Der globale und an Schärfe zunehmende internationale Wettbewerb veranlasst Unternehmen dazu, nicht nur auf die Fortentwicklung etablierter Verfahren und Technologien zu setzen, sondern verstärkt neuartige Fertigungsprozesse und -abläufe zu schaffen. Der Bedarf an neuen, wirtschaftlichen Fertigungsverfahren mit kurzen Bearbeitungszeiten sowie die kontinuierlich steigenden Anforderungen an die Produkteigenschaften rücken innovative Technologien dabei zunehmend in den Mittelpunkt der Forschung. Doch um neu entwickelte Technologien erfolgreich zu implementieren und im Markt einzusetzen, bedarf es einer Vorgehensweise bzw. eines Prozessmodells zum Innovations- und Technologiemanagement. Hierfür bietet sich eine breite Vielfalt an Modellen an. Jedoch zeigt eine genaue Untersuchung vorhandener Prozessmodelle, dass diese sich hauptsächlich auf die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der neuen Technologie fokussieren.

Die Wechselwirkungen zwischen dieser neuen Technologie und deren logistischer Gestaltung finden dabei kaum Betrachtung. Erst nach der ersten Inbetriebnahme der neuen Technologie werden deren Auswirkungen auf die logistischen Prozesse untersucht, was zu einer verspäteten logistischen Reife führt. Die Logistik muss vielmehr in die frühen Phasen der Technologieentwicklung eingebunden werden, um die neue Technologie schnell logistisch zu beherrschen.

Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, die relevanten logistischen Aufgaben während der einzelnen Phasen des Technologielebenszyklus zu ermitteln. Des Weiteren erforscht diese Arbeit die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen den technologiespezifischen Merkmalen und den Parametern zur Produktionsplanung und -steuerung. Für die ermittelten Logistikaufgaben sind in einem weiteren Schritt dieser Arbeit Methoden zu entwickeln, die zu einer schnellen und effizienten Beherrschung der logistischen Prozesse bei einer Technologieänderung beitragen. Dabei werden hauptsächlich die frühen Phasen der Technologieentstehung und des Technologiewachstums fokussiert.

Am Beispiel der technologischen Innovation „Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung“ werden die erarbeiteten Methoden auf ihre Wirksamkeit erprobt. Dabei soll darauf abgezielt werden, diese neue Technologie so früh wie möglich logistisch zu beherrschen und ihre logistischen Potenziale auszuschöpfen.

Stichwörter: Technologiemanagement, Technologielebenszyklus, logistische Beherrschung von Technologien, adaptive Produktionsplanung und -steuerung, Materialflusssimulation

Abstract

The global and in sharpness increasing international competition requires from companies, in addition to the continuous improvement of their established technologies, the creation of new manufacturing processes and flows. The requirement of new economic manufacturing procedures with short operating time as well as the continuous increase of requirements concerning the product properties moves innovative technologies increasingly into the focal point of the research. But in order to implement successfully the new developed technologies and to introduce them into the market, an approach or a processing concept is required for managing these innovative technologies. For this purpose a wide variety at processing concepts for innovation and technology management exists.

However, a thorough analysis of these concepts shows, that these are mainly focused on the technical and economic feasibility of the new technology. The reciprocal effects between the new technology and its logistic arrangement are thereby not taken into account. The impacts of a new technology on the logistic processes are tested only after the first start-up of this technology, which leads to a late logistic ripe. The logistics must be rather merged in the early phases of the technology development, in order to control logistically the new technology as fast as possible.

The target of this work is to identify the relevant logistics tasks which help a quick and efficient mastering of production processes during a technology change. These tasks are derived from a thorough investigation of the technology life cycle. It is thereby emphasised mainly on the early phases “technology emergence” and “technology growth”. For these tasks adequate methods are then developed. Furthermore this work identifies the impacts of the technological metrics on the parameters of production planning and control.

Based on the example of the technological innovation „precision forging with integrated heat treatment“ the compiled methods are validated. The early logistic control of this new technology and tapping its logistic potentials are thereby aimed.

Key figures: technology management, technology life cycle, logistic control of technologies, adaptive production planning and control, material flow simulation

1. Einleitung

Um in hart umkämpften Märkten Überlebenschancen zu haben, sehen sich Unternehmen gezwungen, technologische Innovationen zu entwickeln und zu beherrschen [BUL02]. Durch technologische Innovationen eröffnen sich neue Produkt-Markt-Felder, und Differenzierungs- oder Kostenvorteile lassen sich auf vorhandenen Märkten gegenüber Konkurrenten erzielen. Mit dem Management dieser neuen Technologien ist ein sehr komplexes Aufgabenfeld verbunden, dessen Bewältigung Unternehmen in der Praxis schwerfällt. Gemeint sind dabei die systematische betriebswirtschaftliche Planung, Organisation, Durchführung und Kontrolle aller Unternehmensaktivitäten, die auf die Schaffung und Nutzung technologischer Innovationen abzielen [GER05]. Für ein effizientes Technologiemanagement werden in der Praxis Prozessmodelle zum Zwecke der Standardisierung der ablaufenden Prozesse eingesetzt. Ebenso zahlreich wie die Einsatzmöglichkeiten der Prozessmodelle sind deren Ausgestaltungen, die von der jeweiligen Zielsetzung des Unternehmers oder des Forschers abhängen [DIS05].

Auch wenn sich die zahlreichen Prozessmodelle zum Technologiemanagement in Inhalt und Ablauf unterscheiden, sind sie im Hinblick auf die Betrachtung der logistischen Aspekte gleich. Eine Untersuchung dieser Modelle zeigt, dass sich diese fast ausschließlich auf die technische und wirtschaftliche Machbarkeit der neuen Technologie fokussieren, ohne dabei deren Auswirkung auf die logistische Gestaltung der Fertigungsprozesse zu berücksichtigen. Wegen der späten Einbindung der Logistik in die Abläufe des Technologiemanagements werden die mit der technologischen Innovation verbundenen logistischen Potenziale nur bedingt ausgeschöpft.

Aus diesem Grund zielt die vorliegende Arbeit darauf ab, eine Vorgehensweise zu erarbeiten, welche die aus Sicht der Logistik erforderlichen Aufgaben schon während der frühen Schritte des Technologiemanagements einbezieht. Hierfür sollen zuerst, abgeleitet aus einer logistischen Untersuchung des Technologielebenszyklus, diese logistischen Aufgaben identifiziert werden. Des Weiteren werden die Zusammenhänge zwischen den logistischen Planungsparametern und den technologiespezifischen Kenngrößen untersucht.

Für eine effiziente Durchführung dieser Aufgaben werden anschließend simulationsbasierte Werkzeuge und Methoden erarbeitet, die am Beispiel der technologischen Innovation „Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung“ auf ihre Wirksamkeit erprobt werden. Dabei soll darauf abgezielt werden, diese neue Technologie auch logistisch zu beherrschen und ihre logistischen Potenziale auszuschöpfen.

Die vorliegende Arbeit ist folgendermaßen aufgebaut: Kapitel 2 stellt zunächst die Notwendigkeit zur Entwicklung neuer Technologien sowie die aus logistischer Sicht zu erfüllenden Ansprüche vor. Dabei werden die Schlüsselbegriffe wie Beherrschung und Logistikziele definiert.

In Kapitel 3 werden die Grundlagen des Technologiemanagements beschrieben. Darüber hinaus werden, zusätzlich zu den relevanten Prozessmodellen zum Technologiemanagement, vorhandene Ansätze zur Beherrschung von Technologieänderungen dargestellt.

Kapitel 4 dient der Ableitung des Handlungsbedarfs und der Beschreibung der daraus resultierenden Ziele dieser Arbeit. Neben der Formulierung der Anforderungen an die zu entwickelnden Methoden und Werkzeuge wird die Vorgehensweise dargestellt.

Die Zusammenhänge zwischen der Technologie und Logistik werden anschließend in Kapitel 5 ermittelt. Im ersten Schritt werden die Abhängigkeiten der logistischen Planparameter von den technologiespezifischen Parametern identifiziert. Dies erfolgt zuerst analytisch und dann mit Hilfe der Korrelationsanalyse. Anschließend wird der Technologielebenszyklus aus logistischer Sicht untersucht. Daraus werden die relevanten logistischen Aufgaben identifiziert, die für eine erfolgreiche Implementierung einer neuen Technologie von großer Bedeutung sind. Es wird dabei hauptsächlich auf die frühen Phasen des Technologielebenszyklus fokussiert.

Im darauf folgenden Kapitel werden Methoden zur logistischen Beherrschung der Technologieänderung entwickelt. Neben der Erarbeitung einer Vorgehensweise zur simulationsbasierten Gestaltung von Prozessketten infolge einer Technologieänderung wird eine Methode zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung erarbeitet.

Kapitel 7 widmet sich einem neu entwickelten simulationsbasierten Werkzeug für die Gestaltung, Planung und das Monitoring von Prozess- und Lieferketten. Kapitel 8 verdeutlicht anhand der Entwicklung des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung die Anwendung der erarbeiteten Methoden sowie des entwickelten Werkzeugs.

Kapitel 9 fasst abschließend die Arbeit zusammen und schlägt Themen für weitergehende Forschungen vor.

2. Ausgangssituation und Begriffserklärung

2.1 Neue Technologien

2.1.1 Notwendigkeit zur Entwicklung neuer Technologien

Die Förderung von neuen Technologien entwickelt sich immer mehr zum zentralen Anliegen der heutigen Wirtschaft. Neue Technologien haben für die Unternehmen eine entscheidende strategische Bedeutung und fungieren sowohl auf der *mikro*- als auch auf der *makroökonomischen* Ebene [ZAH95; QIA02].

Auf der *mikroökonomischen* Ebene entwickeln sich neue Technologien zu einem bedeutenden Erfolgsfaktor und zu einem wichtigen Grundstein der Überlebensfähigkeit von Unternehmen. Sie schaffen die Grundlage für die technischen Kernkompetenzen eines Unternehmens und sorgen für nachhaltige Wettbewerbsvorteile. Weil der Unternehmenserfolg anhand der marktbezogenen Leistungen gemessen wird [DIS05], die hauptsächlich von Produkt- und Prozesstechnologien abhängen, müssen Unternehmen verstärkt auf innovativere Technologien setzen. Nur dadurch können sie wettbewerbsfähige Produkte absetzen und somit in dem immer anspruchsvolleren Markt ihre Überlebenschancen bewahren. Des Weiteren dringen Technologien in fast alle Unternehmungsaktivitäten ein, und das Rennen um die Technologievorherrschaft entwickelt sich zum Wettbewerb zwischen den Unternehmen [BUL02]. Deshalb sehen sich Unternehmen gezwungen, nicht nur auf etablierte Technologien zu setzen, sondern vielmehr neue und innovative Technologien zu erforschen. Weil neue Technologien darüber hinaus potenzielle Entwicklungschancen schaffen, werden sie als eine wichtige strategische Ressource gesehen [QIA02].

Auf der *makroökonomischen* Ebene treten neue Technologien als wesentliche Mechanismen wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Veränderungen auf. Sie stellen Arbeitsplätze sowie Kapital sicher [DIS05] und tragen entscheidend zum Wirtschaftswachstum bei, wodurch die Lebensgrundlage gesichert und der Lebensstandard gesteigert wird.

2.1.2 Heutige Anforderungen an neue Technologien

Mit der steigenden Technologiebedeutung ergeben sich kontinuierlich neue Anforderungen, die zu erfüllen sind. In Tabelle 2-1 sind die relevanten Anforderungen aufgelistet.

Im Gegensatz zu den 1970er Jahren, als Technologien fast ausschließlich auf die Produktqualität und den Produktpreis abzielten, muss eine neue Technologie heutzutage zusätzlich Qualitäts-, Wirtschaftlichkeits- sowie gesetzliche Anforderungen erfüllen.

Tabelle 2-1: Anforderungen an neue Technologien

Qualität	Wirtschaftlichkeit	Normen/ Gesetze

▪ Produktqualität
▪ Technologieattraktivität:
  ▪ Prozesssicherheit
  ▪ Flexibilität
  ▪ Produktivität
  ▪ Automatisierbarkeit
  ▪ Weiterentwicklungspotenzial/ Erfolgswahrscheinlichkeit
▪ Ressourcenstärke:
  ▪ Integration in bestehende Fertigung
  ▪ Anpassungspotenzial
	▪ Investitionsaufwand
	▪ Produzierter Ausschuss
	▪ Betriebskosten
	▪ Rohmaterialnutzung
	▪ Nutzung alternativer Werkstoffe
	▪ Einsparungs- und Substitutionspotenzial
		▪ EN ISO 14001:
		  ▪ Umweltverträglichkeit
		  ▪ Ausfallstoffe

Durch die Einführung neuer Technologien soll eine verbesserte Produktqualität erreicht werden. Zusätzlich zu einer hohen Funktionalität werden die Anforderungen an die Geometrie der Erzeugnisse immer schärfer. So wird stets eine verbesserte Oberflächengüte angestrebt, und die Toleranz der Produktmaße wird immer enger, sodass die neuen Technologien genauere Verfahren anbieten müssen. Im Bereich der Fügetechnik z. B. besteht Bedarf an neuen Technologien, die Toleranzschwankungen ausgleichen, erhöhte Stabilitätskriterien erfüllen und Bauteilbeschädigung vermeiden. Deshalb werden hierfür z.B. Verfahren zum berührungslosen Laserschweißen entwickelt und kontinuierlich weiter optimiert [VOL04].

Die Qualität einer neuen Technologie wird darüber hinaus anhand der *Technologieattraktivität* und der *Ressourcenstärke* gemessen [EVE03]. Die *Technologieattraktivität* beschreibt sämtliche technischen Vorteile, die aus den Wettbewerbsvorteilen der neuen Technologie resultieren. Diese werden durch die Indikatoren Prozesssicherheit, Flexibilität, Produktivität, Automatisierbarkeit und Erfolgswahrscheinlichkeit beschrieben. Die aus der Technologie resultierenden Anlagen und Prozesse müssen beherrschbar und stabil sein. Das ständige Streben nach der sogenannten Sechs-Sigma-Produktion, auch Nullfehler-Produktion genannt, bedarf innovativerer Technologien mit einer hohen Prozesssicherheit. Des Weiteren geht der heutige Trend stets in die Richtung, flexible Technologien zu entwickeln. Dies bedeutet, dass eine Technologie in unterschiedlichen Verfahrensvarianten verwendet werden kann. Dies wird durch die Konzeption modular aufgebauter Werkzeuge und Anlagen ermöglicht. Durch schnell wechselbare Werkzeugsysteme und wandelbare Maschinen wird es möglich, eine Technologie bzw. der daraus resultierende Fertigungsprozess für verschiedene Zwecke zu verwenden. Fer-

ner soll eine neue Technologie sowohl für die Fertigung kleiner als auch großer Stückzahlen geeignet sein [EVE03]. Eine weitere Anforderung an neue Technologien ist das Erreichen einer hohen technischen Verfügbarkeit, um die Produktivität zu steigern. Um die Reproduzierbarkeit der Fertigungsabläufe sicherzustellen, wird verstärkt nach automatisierbaren Technologien gefragt. Werden alle diese Anforderungen von einer neuen Technologie erfüllt, so steigt die Erfolgswahrscheinlichkeit und somit die Technologieattraktivität. Eine Technologie ist außerdem *ressourcenstark*, wenn sie in die bestehende Fertigung integrierbar ist. Sie muss ein hohes Anpassungspotenzial aufweisen, um veraltete Technologien ablösen zu können.

Die Wirtschaftlichkeitsaspekte betreffen zusätzlich zum Erzeugnispreis die Kosten der aus der Technologie resultierenden Anlagen und Prozesse. Neue Technologien müssen günstige Herstellkosten der Produkte sowie wirtschaftliche Anlagen und Prozesse erzielen. Deshalb müssen sowohl die Investitionen in die neue Technologie als auch die Herstellkosten reduziert werden. Niedrige Herstellkosten können durch stabile Technologien und geringe Betriebskosten erreicht werden. Stabile Technologien verursachen geringe Ausschussraten und resultieren in einer reproduzierbaren Qualität, was die Kosten infolge von Reparaturen und Mehrarbeit senkt. Eine weitere Möglichkeit zur Senkung der Herstellkosten und somit des Produktverkaufspreises besteht darin, Technologien mit einem geringeren Rohstoffverbrauch zu entwickeln. Bei umformenden Verfahren, wie zum Beispiel dem Massivumformen, sind Technologien gefragt, die präziser formen und somit weniger Rohmaterial für die Herstellung des gleichen Schmiedeteils benötigen.

Neben niedrigen Verkaufspreisen müssen neue Technologien den Kosten während der Produktnutzung Rechnung tragen. Hierfür kann die Entwicklung neuer Werkstoffe zu weiteren Kosteneinsparungen führen. In der Verkehrstechnik z. B. ist der Leichtbau unumgänglich [GOJ06, HER04]. Hierbei werden momentan in erster Linie Leichtmetalllegierungen eingesetzt. Sowohl in der Automobilbranche als auch im Flugzeugbau wird in der nahen Zukunft hauptsächlich auf die Nutzung von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen (CFK) gesetzt und somit eine potenzielle Gewichtsreduzierung um 30 % und eine Kostenreduzierung um 40 % gegenüber dem Leichtmetallbau ermöglicht [HER04]. Das Ausschöpfen der Potenziale von CFK bedarf wiederum rationeller und automatisierbarer neuer Produktionsverfahren für Hochleistungsfaserverbunde.

Ferner soll die Nutzung der neuen Technologie selbst geringere Betriebskosten verursachen. Die daraus resultierenden Anlagen sollen weniger Energie sowie Betriebsmittel verbrauchen und möglichst einen geringeren Flächenbedarf als bei der konventionellen Technologie erfordern.

Durch die Substitution veralteter durch innovativere Technologien sollen weitere Einsparungen erzielt werden. Dies wird ermöglicht, indem z. B. ein neues Fertigungsverfahren nicht wertschöpfende Tätigkeiten minimiert oder komplette Arbeitsvorgänge eliminiert. Die Minimierung der nicht wertschöpfenden Tätigkeiten kann erreicht werden, wenn z. B. die Einführung der neuen Technologie zur Automatisierung der Handhabung und Transportprozesse führt. Eine Eliminierung von Arbeitsvorgängen dagegen kann bspw. durch die Implementierung hoch präziser Formverfahren, durch die das sukzessive Abgraten oder Feinschleifen entfällt, erreicht werden.

Neben den Anforderungen, hoch qualitative und wirtschaftliche Technologien zu entwickeln, unterliegen Innovationen in den letzten Jahren verstärkt neu definierten Normen und Gesetzen, die sich wiederum in verschärften Anforderungen niederschlagen. Die DIN EN ISO 14001 z. B. verpflichtet produzierende Unternehmen, eine betriebliche Umweltpolitik, Umweltziele und ein Umweltprogramm festzulegen sowie ein entsprechendes Managementsystem aufzubauen, um eine vordefinierte Umweltleistung zu erzielen [GAS05]. Hiervon sind die in einem Unternehmen eingesetzten Technologien stark betroffen, weil sie auf die Umwelt einwirken können. In Abhängigkeit von der Technologie werden unterschiedliche Emissionen in die Atmosphäre, Abwässer sowie Abfälle erzeugt. Weil die Umweltnorm Unternehmen zu einer messbaren Reduzierung ihrer Erzeugnisse verpflichtet, sind neue Technologien gefragt, die umweltschonender agieren.

2.1.3 Steigende Bedeutung der Logistik bei der Entwicklung neuer Technologien

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Anforderungen müssen neue Technologien verstärkt logistischen Anforderungen Rechnung tragen.

Die Zeitkomponente wird immer bedeutender bei der Entwicklung neuer Technologien. Die Veränderungen werden immer schneller und die Technologiesprünge werden immer häufiger und machen somit den Wettbewerb stetig schwieriger. Zusätzlich werden die Produktlebenszeiten immer kürzer und die Entwicklungszeiträume immer enger. Aus diesem Grunde muss die Zeitspanne zwischen der Technologieentwicklung und deren erster Vermarktung bedeutend reduziert werden. Aber auch der Hochlauf der neuen Technologie muss schnell erfolgen. Hierfür sind logistische Methoden gefragt, die das Beherrschen der Technologieänderung sowie der daraus resultierenden Fertigungsprozesse ermöglichen.

Die logistischen Anforderungen an neue Technologien übertreffen die Anforderungen an Technologie- und Produktlebenszeiten. Eine von der Unternehmensberatung Deloitte & Touche [Del98, LOP05] weltweit durchgeführte Befragung von 900 Führungskräften ergab, dass die beiden logistischen Zielgrößen Liefertreue und Lieferfrist als die beiden wichtigsten strategischen Wettbewerbsfaktoren für die Produktion des 21. Jahrhunderts betrachtet werden. Weil die Kunden inzwischen eine hohe Funktionalität und Qualität der Erzeugnisse als selbstverständlich voraussetzen, kann sich eine höhere Logistikleistung auf die Erlöse durch größere Marktanteile und höhere Preise positiv auswirken. Diese Logistikleistung stellt sich für den Kunden im Wesentlichen anhand der Termin- und Mengentreue sowie der zugesagten Lieferzeiten dar [WIE98]. Dies verlangt von produzierenden Unternehmen zum einen eine gute Termineinhaltung auf allen Stufen der Auftragsabwicklung, zum anderen erfordern kurze Lieferzeiten niedrige Durchlaufzeiten an allen Arbeitssystemen des zeitkritischen Pfades. Deshalb sind neue Technologien mehr denn je gefragt, um kurze Prozess- und Umrüstzeiten zu ermöglichen.

Ferner ist stets die zuverlässige Einhaltung der Liefertermine und -mengen bei gleichzeitiger Senkung der Umlauf- und Lagerbestände gefragt. Hierfür müssen die aus der neuen Technologie resultierenden Fertigungsabläufe stabil und beherrschbar sein.

2.1.4 Anforderungen an neue Technologien am Beispiel der deutschen Schmiedeindustrie

Die Massivumformung wird seit über 100 Jahren industriell angewandt und stellt, trotz einer harten Konkurrenz mit anderen Verfahren wie dem Gießen oder dem Sintern, nach wie vor eines der wichtigsten Verfahren der Produktionstechnik dar [HUS03]. Gründe hierfür sind v. a. die hohe Produktqualität der mit Massivumformverfahren hergestellten Teile sowie die ausgezeichneten Festigkeitseigenschaften der geschmiedeten Bauteile [VIE98]. Schmiedeteile werden als dynamisch hoch belastbare Bauteile bevorzugt eingesetzt z. B. in Motoren, Getrieben, Lenkungen oder Fahrwerken. Schmiedeunternehmen haben sich somit überwiegend zu Zulieferern der Automobilindustrie entwickelt. Insgesamt 71 % der Schmiedeerzeugnisse werden an Automobilhersteller oder deren direkte Zulieferern geliefert [RUD00].

Seit Mitte der 1980er Jahre hat sich der Wettbewerb für deutsche Schmiedeunternehmen grundlegend verschärft. Zwischen 1985 und 2001 ist die Anzahl der Gesenkschmieden von rund 150-160 auf rund 100 Betriebe gesunken, und das, obwohl die Produktionsmenge im gleichen Zeitraum von 793.500 Tonnen auf rund 1.522.000 Tonnen gestiegen ist. Im Jahr 2004 wurde sogar eine Produktionsmenge von mehr als 2,5 Millionen Tonnen erzielt [ADE05]. Darüber hinaus stellt die Internationalisierung und Globalisierung der Märkte für deutsche Schmiedeunternehmen weitere Herausforderungen dar, die neue Denkansätze erfordern. Mittel- und osteuropäische Länder sowie Indien und China werben mit ungleich niedrigeren Arbeitskosten. Daher spielt der technologische Fortschritt in diesem harten Verdrängungskampf eine immer größere Rolle. Deutsche Schmiedeunternehmen sind darauf angewiesen, auf dem Weltmarkt auf der Basis von innovativen Spitzenerzeugnissen überdurchschnittliche Preise zu erzielen.

Die aktuellen Verfahren zum Massivumformen haben eine hohe Zuverlässigkeit und Effizienz erreicht. Sie sind bereits so weit entwickelt, dass sie nach dem derzeitigen Kenntnisstand kaum weiteres technologisches Optimierungspotenzial besitzen. Die deutsche Schmiedeindustrie muss daher einen neuen Weg gehen, indem sie alternative Prozessvarianten und innovative Technologien zum Zwecke einer Effizienz- und Qualitätssteigerung realisiert. Des Weiteren wird eine Verknüpfung der technologischen und logistischen Betrachtungsaspekte zwingend erforderlich, um weitere verdeckte Optimierungspotenziale auszuschöpfen. Deutsche Schmiedeunternehmen werden immer mehr mit den folgenden Anforderungen konfrontiert:

- Erhöhung der Fertigungstiefe
- Neue Verfahren
- Rationalisierung und Automatisierung
- Neue Werkstoffe (Werkstück und Werkzeug)

Schmiedeunternehmen sind stets gefordert, einbaufertige Teile zu liefern. Über die mechanische Bearbeitung hinaus müssen sie sich mit der Fertigung ganzer Komponenten und Module beschäftigen [SCH05a].

Die erhöhten Ansprüche an Maß- und Formgenauigkeit von einbaufertigen Teilen zwingen Unternehmen der Massivumformung, neue Technologien zu entwickeln. Um ein Optimum an Bauteilqualität und Wirtschaftlichkeit zu erreichen, werden konventionelle Schmiedeverfahren verstärkt durch neue Technologien abgelöst, wie das *Thixo-Schmieden* [ABD02, SEI06] oder *Präzisionsschmieden* [BEH07, SPE06]. Beim Thixo-Schmieden handelt es sich um die Formgebung von Bauteilen in einem teilflüssigen Zustand. Dies führt zu einem besseren Werkstoffffluss und ist daher sehr geeignet für das Schmieden von Bauteilen mit komplexen Geometrien und guten mechanischen Eigenschaften, wie hoher Bruchdehnung oder Streckgrenze [WOL04]. Eine bessere Produktqualität und Genauigkeit kann ebenso dank des Präzisionsschmiedens erzielt werden. Das konventionelle Gesenkschmieden wurde in erster Phase durch das Genauschmieden abgelöst. Dadurch entfällt der Arbeitsvorgang Abgraten, und 10 % bis 30 % des Einsatzgewichts können eingespart werden [HUS03]. Um noch bessere Genauigkeiten erreichen zu können, wird das Präzisionsschmieden entwickelt, das dank des Wegfalls der spanenden Weichbearbeitung zu einer weiteren Verkürzung der Prozesskette führt und endkonturnahe Schmiedeteile ohne Grat ergibt [ALT06]. Die Ablösung des konventionellen Schmiedens durch die Präzisionsumformung ermöglicht es, nicht nur die Eigenschaften der Bauteile zu verbessern und die Herstellkosten zu reduzieren, sondern auch die logistische Leistungsfähigkeit der Prozesskette zu steigern. Hierfür sind logistische Maßnahmen zur Automatisierung der Prozesse und zu ihrer Verknüpfung mit den vorgelagerten sowie sukzessiven Arbeitsvorgängen unerlässlich.

Des Weiteren setzen Schmiedeunternehmen verstärkt auf die Anwendung neuer Werkstoffe für die Verbesserung der Werkzeuge sowie der Bauteilqualität.

Weil Schmiedegesenke hohen Belastungen infolge mechanischer, thermischer und tribologischer Beanspruchungen unterliegen, erscheinen auf der Gesenkmatrize unerwünschte Anlasseffekte, die in einem verstärkten Verschleiß resultieren. Hierfür werden neue Werkstoffe, wie z. B. Keramik, erforscht. Keramische Werkstoffe haben dank ihres atomaren Aufbaus einen hohen Verschleißwiderstand sowie eine hohe thermische Belastbarkeit und werden deshalb verstärkt bei der Fertigung der Gesenkmatrize verwendet [DEI06].

Auf der Werkstückseite werden neue Vergütungsstähle (42CrMo4) oder ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische (AFP) Stähle (wie z. B. cdpSo38 oder cdpSo40) anstelle von Einsatzstählen verwendet. Dies ermöglicht eine Eliminierung der Weichbearbeitung der Bauteile, vorausgesetzt, dass eine Wärmebehandlung unmittelbar nach dem Schmieden aus der Restwärme erfolgt. Dadurch wird die komplette schmiedetechnische Prozesskette verkürzt, was zu wirtschaftlichen Einsparungen führt [ARN04].

2.2 Beherrschung von logistischen Prozessen

2.2.1 Erklärung des Begriffs „Beherrschung“

Eine eindeutige Definition des Begriffs Beherrschung wird in der einschlägigen Literatur nicht vollzogen. Beherrschung wird stattdessen ständig mit dem Controlling bzw. der Regelung in einen engen Zusammenhang gebracht [MÜL98, WIL96, WIE02, WIE97]. Darüber hinaus ist in der Literatur von Beherrschung immer dann die Rede, wenn es um Komplexität [SCH97, MÜL98], Dynamik [WIL96] oder Turbulenzen [WIE05] geht.

Der Begriff Beherrschung wird in verschiedenen betriebswirtschaftlichen sowie technischen Forschungsfeldern verwendet. Besondere Bedeutung hat er im Qualitätsmanagement.

Ziel des Qualitätsmanagements ist, die Produkte und Produktion funktions- und prozessorientiert so auszulegen, dass die Fertigung in fähigen und beherrschten Prozessen ermöglicht wird [HER93, KAM04]. Dabei wird hauptsächlich das Ziel der Null-Fehler-Fertigung verfolgt. Es sind hierfür zahlreiche Methoden und Werkzeuge entwickelt worden, um den Prüfaufwand erheblich zu reduzieren und die Ausschussquoten deutlich zu senken. Bei der Qualitätssicherung wird die Beherrschung eines Prozesses oder einer Maschine quantitativ bewertet. Es wird geprüft, wie hoch der Anteil der produzierten Gutteile ist und ob der gemessene Wert dem im Vorfeld definierten Ziel entspricht. Hierfür wurden die Kennzahlen Prozessfähigkeit C_p, Prozessfähigkeitskennwert C_{pk}, Maschinenfähigkeit C_m und Maschinenfähigkeitskennwert C_{mk} definiert [PFE01]. Diese Kennzahlen kennzeichnen die Stabilität und Reproduzierbarkeit eines Produktionsprozesses. Es wird dabei allerdings vorausgesetzt, dass die gemessenen Daten, ob Anzahl der Gutteile oder Abweichung eines Qualitätsmerkmals, normalverteilt sind. Es wird des Weiteren vorausgesetzt, dass die bewerteten Prozesse stabil und beherrschbar sind.

Bild 2-1 zeigt eine Normalverteilung sowie die wichtigen Parameter zur Auswertung der Prozessfähigkeit.

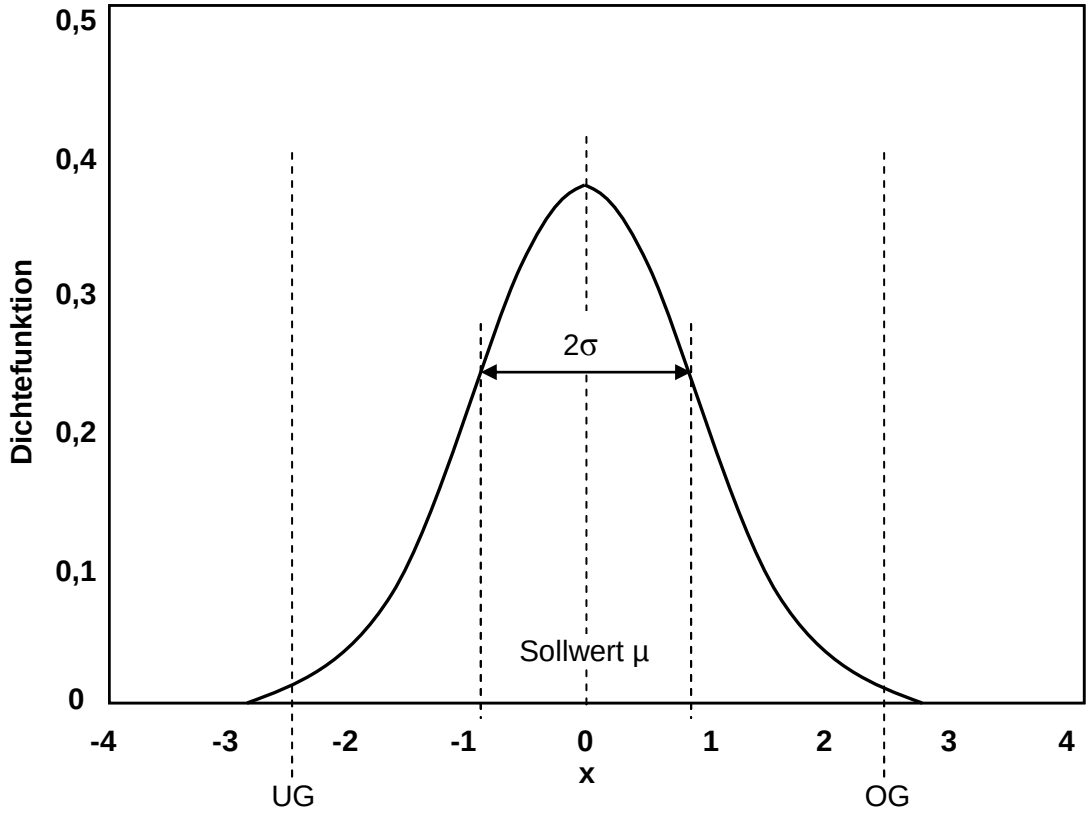
Für die Berechnung der Kennzahlen Prozessfähigkeit C_p und -kennwert C_{pk} sind die Parameter μ (Sollwert der gemessenen Messgröße), Obere und Untere Grenze (OG, UG) sowie die berechnete Standardabweichung σ erforderlich. Die folgenden Gleichungen (1) und (2) zeigen die entsprechenden Berechnungsformeln [RIN99].

$$C_p = \frac{OG - UG}{6\sigma} \tag{1}$$

$$C_{pk} = \frac{\min\{(OG - \mu);(\mu - UG)\}}{3\sigma} \tag{2}$$

mit:

OG, UG	Obere bzw. Untere Grenze
C_p, C_{pk}	Prozessfähigkeit bzw. -kennwert
σ	Standardabweichung
μ	Sollwert der Messgröße



OG: Obere Grenze
UG: Untere Grenze
x: Messgröße (z.B. Durchmesser)
σ : Standardabweichung

Bild 2-1: Normalverteilung

Der Kennwert C_p bzw. C_m setzt die Breite der Prozess- bzw. Maschinenstreuung zur Breite des vordefinierten Toleranzbereichs ins Verhältnis. Die Indices C_{pk} und C_{mk} berücksichtigen zusätzlich die Lage des Mittelwerts der Messreihe. Während die Kennwerte C_p und C_m die grundsätzlichen Fähigkeiten von Prozess und Maschine beschreiben, wird durch C_{pk} und C_{mk} die Beherrschung von Prozess und Maschine bewertet [KAM04, PFE01]. Ein Prozess wird beherrscht, wenn die gemessenen Werte die Mindestanforderungen der Qualitätssicherung erfüllen und zielgerecht innerhalb des Toleranzbereichs liegen. Es werden heutzutage Werte für C_p bzw. C_m von 2 angestrebt, was der sogenannten Sechs-Sigma-Produktion entspricht.

Auch in der Regelungstechnik erhielt der Beherrschungsbegriff große Bedeutung. Die Regelungstechnik zielt z. B. auf die Beherrschung komplexer, dynamischer Systeme ab. Die Einsatzgebiete sind vielfältig und schließen mechatronische Komponenten und Systeme, nahezu alle Bereiche der Fahrzeugtechnik, produktions- und verfahrenstechnische Prozesse sowie medizintechnische Geräte ein. Grundansatz dabei ist die Verwendung geschlossener Regelkreise [BRA05, GEE04]. In einem geschlossenen Regelkreis wird die Regelgröße (Ist-Wert) fortlaufend erfasst, mit der Führungsgröße (Soll-Wert) verglichen und abhängig von diesem Vergleich über entsprechende Änderungen der Stellgröße im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße angepasst [DIN94].

Gleicht der Ist-Wert dem Soll-Wert und kann er vom Regelkreis in dem Zustand gehalten werden, so wird das System beherrscht.

In der vorliegenden Arbeit wird dieser Begriff wie folgt definiert: „Beherrschung ist das Meistern einer Aufgabe oder eines Systems durch Analyse, Überwachung, Diagnose und Regelung, um im Vorfeld definierte Ziele im Rahmen einer zulässigen Abweichung zu erreichen“. Unter dem Begriff „System“ werden dabei zweckmäßig Logistik-, Materialfluss- und Produktionssysteme zusammengefasst [VDI97, WIE04]. Die vordefinierten Ziele können qualitäts-, betriebswirtschafts- oder logistikbezogen sein. Die Beherrschung eines Systems kann entweder quantitativ oder qualitativ erfasst werden. Bei einer quantitativen Beurteilung der Beherrschung wird ein Erfüllungsgrad der im Vorfeld definierten Ziele gemessen. Bei einer qualitativen Bewertung wird geprüft, ob das System in seiner Funktionalität richtig genutzt wird. Die Beherrschung eines Systems zielt somit auf die dauerhafte Erreichung von vordefinierten Zielen. Mit der logistischen Beherrschung von Systemen ist daher gemeint, Systeme in der Art zu gestalten, zu planen, zu überwachen und zu regeln, dass die Logistikziele erreicht werden können. Für das bessere Verständnis werden im Folgenden die Logistikziele umfassend beschrieben.

2.2.2 Beschreibung der Logistikziele

Wiendahl systematisiert die Logistikziele durch die zwei Oberziele hohe Logistikleistung und niedrige Logistikkosten [WIE05a] eines Produktionssystems. Dabei ist zu differenzieren zwischen externen und internen Zielgrößen [LÖD05]. Die externen Zielgrößen des Oberziels „hohe Logistikleistung“ beinhalten gegenüber dem Kunden die Zielgrößen Lieferzeit, Lieferterminabweichung und Liefertreue im Fall einer Auftragsfertigung bzw. Servicegrad bei Lagerfertigung [LUT02]. Daraus lassen sich die in der Fertigung messbaren internen Zielgrößen Durchlaufzeit, Terminabweichung und Termintreue ableiten. Die Logistikkosten werden unternehmensintern vom Bestand (Lagerhaltungs- sowie Kapitalbindungskosten) und von der Ressourcenauslastung (Herstellkosten) bestimmt. Diese Verluste resultieren in erhöhten Herstellkosten und wirken somit extern auf den Kunden.

In der einschlägigen Literatur sind zahlreiche Zielsysteme der Logistik zu finden [SYS90, REI05, PFO00, WEB02, VDI00], die sich entweder in ihrem Detaillierungsgrad oder ihrer Sichtweise auf die Logistik unterscheiden. Im Folgenden wird das Zielsystem nach Wiendahl weiter verfolgt [WIE05a], welches in Bild 2-2 dargestellt ist.

Unter *Lieferzeit* ist die Zeitdauer zwischen dem Auftragseingang und der -auslieferung zu verstehen [WIE97]. Sie wird i. d. R. in Betriebskalender- bzw. Arbeitstagen gemessen [LÖD05]. Eine kurze Lieferzeit ist unbestritten ein wesentlicher wirtschaftlicher Erfolgsfaktor eines Unternehmens. Empirische Untersuchungen zeigten, dass Unternehmen mit kurzen Lieferzeiten schneller wachsen und höhere Gewinne erzielen als Unternehmen mit langen Lieferzeiten.

Aus der Differenz zwischen dem tatsächlichen und dem vereinbarten Liefertermin ergibt sich die *Lieferterminabweichung.* Entsprechend dieser Definition bedeutet eine positive Abweichung eine Verspätung und eine negative Abweichung eine Verfrühung der Auf-

tragslieferung. Die Lieferterminabweichung kann gegenüber dem Soll- (dem Kunden zugesagten Liefertermin) oder dem ursprünglich vom Kunden gewünschten Liefertermin ermittelt werden [WIE02b].

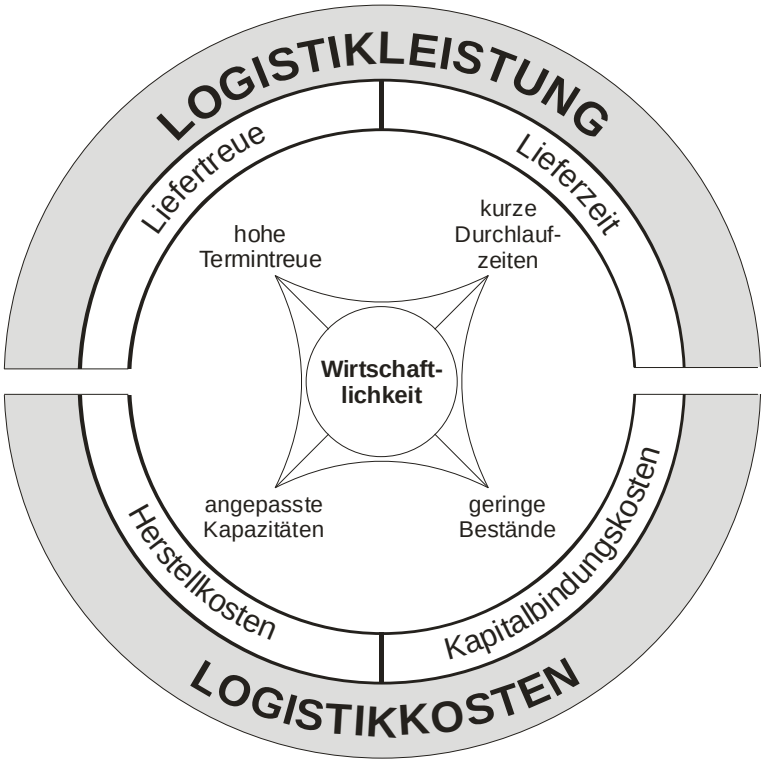


Bild 2-2: Zielsystem der Logistik [WIE05a]

Die *Liefertreue* errechnet sich aus dem prozentualen Anteil der Aufträge, die innerhalb einer definierten Termintoleranz geliefert worden sind. Sie wird für eine definierte Bezugsperiode periodisch gemessen. Dabei kann die Liefertermintoleranz neu definiert oder angepasst werden.

Im Fall einer Lagerfertigung stellt der *Servicegrad* die wichtigste externe Zielgröße dar [WIE97, LÖD05]. Dieser bezeichnet den prozentualen Anteil der sofort befriedigten Anfragen aller Kundenanfragen in einem vordefinierten Bezugszeitraum. Für die Berechnung dieses Kennwerts können auch die nachgefragten Mengeneinheiten anstelle der Nahfragenanzahl verwendet werden. In diesem Fall ist die Rede vom *gewichteten Servicegrad*.

Die *Durchlaufzeit* eines (Fertigungs-)Auftrags (ZDA) wird berechnet aus der Differenz zwischen dem Bearbeitungsende und der Auftragsfreigabe. Falls die Fertigung in einem linearen Fluss und ohne Verzweigungen abläuft, resultiert sie aus der Summe der einzelnen Durchlaufzeiten (ZDL) aller durchlaufenen Prozesselemente.

Bechte modelliert die Durchlaufzeit mit dem sogenannten Durchlaufelement, welches in Bild 2-3 vereinfacht dargestellt wird.

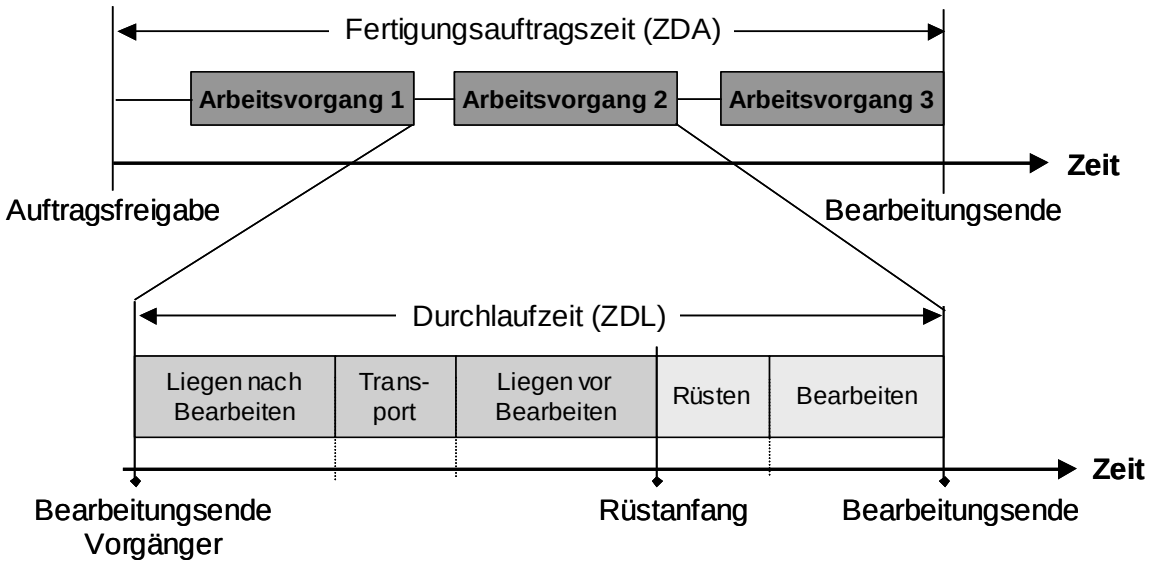


Bild 2-3: Vereinfachtes eindimensionales Durchlaufelement [BEC84]

Das Durchlaufelement beschreibt die Durchlaufzeitanteile eines Fertigungsauftrags, zugeordnet zu den verschiedenen Arbeitsvorgängen. Für die Modellierung eines Arbeitsvorgangs sind die Bestandteile Transportzeit, Liegezeit, Rüstzeit und Bearbeitungszeit relevant. Die Liegezeit beinhaltet das Liegen nach der Bearbeitung des vorhergehenden Arbeitsplatzes sowie das Liegen vor der Bearbeitung am modellierten Arbeitsplatz.

Die interne Zielgröße *Terminabweichung* bezeichnet die Abweichung des tatsächlichen vom geplanten Bearbeitungsende des Auftrags. Sie wird entweder im Abgang oder Zugang gerechnet und heißt dementsprechend Terminabweichung im Abgang bzw. Zugang. Die Terminabweichung im Abgang beschreibt die Verspätung bzw. Verfrühung eines Auftrags gegenüber dem Plan-Fertigstellungstermin [DOM88]. Die Terminabweichung im Zugang drückt aus, ob der Fertigungsauftrag verspätet oder verfrüht gegenüber dem geplanten Starttermin freigegeben wurde.

Generell wird zwischen *Lager-* und *Fertigungsbestand* unterschieden. Der Lagerbestand bezeichnet das Rohmaterial, die Halbfabrikate und Fertigwaren [LÖD05] und wird in Mengeneinheiten oder zum Zwecke der finanziellen Bewertung in Währungseinheiten gemessen. Der Fertigungsbestand, auch Umlaufbestand genannt, wird nach Wiendahl [WIE97] aus den freigegebenen, aber noch nicht fertiggestellten Aufträgen gebildet. Er wird i. d. R. in Vorgabestunden oder Anzahl der Aufträge gemessen. Der Bestand ist in der Produktionslogistik von besonderer Bedeutung, weil er als Zielgröße sowie Regelgröße angesehen wird.

Der Bestand wirkt sich durch die Kapitalbindung und die daraus resultierenden Kosten auf die Unternehmensbilanz aus. Je höher der Bestand ist, desto höher ist die Kapitalbindung und somit die Opportunitätskosten. Dadurch reduziert sich der Spielraum eines Unternehmens für Investitionen. Deshalb ist der Bestand eine bedeutende Zielgröße.

Darüber hinaus wirkt sich der Umlaufbestand direkt auf die Auslastung bzw. Leistung eines Systems sowie auf die Durchlaufzeit aus. Diese beiden Größen verhalten sich

proportional zum Umlaufbestand und steigen somit mit steigenden Beständen. Dieser Zielkonflikt zwischen niedrigen Beständen und kurzen Durchlaufzeiten auf der einen und einer hohen Auslastung auf der anderen Seite wird Dilemma der Ablaufplanung genannt [GUT51, WIE05a]. Wird dieser Zielkonflikt beherrscht, so ist die Rede von einer logistischen Beherrschung. Weil sowohl Auslastung als auch Durchlaufzeit funktional vom Fertigungsbestand abhängen, wird dieser als Regelgröße verwendet, um je nach Unternehmensstrategie eine Positionierung zwischen hoher Auslastung und kurzer Durchlaufzeit zu erzielen. Wegen des Dilemmas der Ablaufplanung ist es nicht möglich, beide Ziele gleichzeitig zu optimieren. Deshalb wird von einer Positionierung und nicht von einer Optimierung gesprochen [WIE03, REI04].

Wiendahl überträgt die Analogie der physikalischen Leistung, welche als Quotient von Arbeit und Zeit definiert ist, auf die logistische Zielgröße *Leistung* [WIE97]. Die Leistung ergibt sich aus dem Quotient vom Abgang in einem Bezugszeitraum und der Länge dieses Zeitraums. Sie wird somit i. d. R. in Stunden pro Betriebskalendertag gemessen. In der Praxis wird diese Leistung als Durchsatz oder Auslastung bezeichnet. Die *Auslastung* beschreibt das Verhältnis von mittlerer und maximal möglicher Leistung eines Arbeitssystems und wird in Prozent berechnet [NYH03].

Wird eine neue Technologie entwickelt und in eine bestehende Fertigungskette integriert, werden logistische Methoden für die Umgestaltung und -planung der resultierenden Produktionssysteme benötigt. Ziel dabei ist das Erfüllen der vordefinierten internen sowie externen Logistikziele aus dem Zielsystem der Logistik. Wenn dies erreicht wird, so ist die Rede von einer logistisch beherrschten Technologie.

3. Stand des Wissens – vorhandene Ansätze zur Beherrschung von Technologieänderung

3.1 Technologiemanagement

3.1.1 Grundlagen des Technologiemanagements

Um den Begriff Technologiemanagement richtig zu verstehen, bedarf es zuerst einer Klärung der Begriffe Technik und Technologie.

Unter der Technologie wird die Gesamtheit der Verfahren zur Produktion von Waren und Dienstleistungen, die einer Gesellschaft zur Verfügung steht, verstanden. Sie deutet auf eine fortschreitende Veränderung hin und ist somit prozessbezogen zu verstehen [SPU98]. Dagegen beinhaltet die Technik die Gesamtheit des technologischen Wissens. Seiffert und Radnitzky [SEI97] definieren die Technik als die Anwendung besonderer Methoden, Prinzipien und Naturgesetze, einzeln oder in Kombination, um bestimmte Wirkungen zu erzielen.

Die Technologie ist somit ein Unterbegriff der Technik und bezeichnet das Anwenden eines oder mehrerer physikalischer, chemischer bzw. biologischer Verfahren in festgelegter logistischer Vernetzung, um bestimmte Stoffe bzw. Erzeugnisse zu gewinnen, zu verarbeiten bzw. herzustellen.

Im weiteren Sinne wird unter Technologiemanagement die Planung, Organisation, Realisierung und Kontrolle des Wissens über Technologien verstanden [SPE02, REN04]. Obwohl in der Literatur die Definition des Begriffs fast gleich ist, bleibt die Zuordnung des Technologiemanagements uneinheitlich. Während Specht und Beckmann [SPE96] das Technologiemanagement als Teilbereich des Innovationsmanagements sehen, definiert Strebel [STR03] das Technologiemanagement als überlappten Aufgabenbereich zum Innovationsmanagement. Die Überlappung stellt dabei das Forschungs- und Entwicklungsmanagement dar. Dabei wird das Innovationsmanagement als die systematische Planung, Umsetzung und Kontrolle von Ideen und zielorientierten Neuerungsstrategien in Organisationen zum Zwecke des Ausbaus und der Nutzung von Wertschöpfungspotenzialen definiert [MAR93, BLE98, PIC00, BER00].

Das „US National Research Council" (NRC) definiert des Weiteren das Technologiemanagement als die fehlende Lücke zwischen dem Management und den Ingenieurwissenschaften [TSC98]. In einem NRC-Bericht [NRC87] wird darüber hinaus das Technologiemanagement wie folgt beschrieben: „Das Technologiemanagement verbindet Ingenieurwissenschaften, Naturwissenschaft und Managementdisziplinen, um sich zum Zwecke der strategischen und operativen Ziele einer Organisation mit der Planung, Entwicklung und Implementierung von technologischen Leistungsfähigkeiten und Potenzialen zu befassen".

Im Wesentlichen hat das Technologiemanagement die folgenden Aufgaben [ZAH95, SPU98]:

- Bei der *Technologiefrüherkennung* geht es um die Identifizierung und Untersuchung von technologischen Trends.
- Während der *Technologieentwicklung* werden Technologien durch Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten entwickelt.
- Die *Technologiebewertung* beurteilt die Einsatzfähigkeit verschiedener Technologien für einen bestimmten Anwendungsfall.
- Die *Technologieplanung* und *-steuerung* beschäftigt sich mit der Frage, welche Technologien für welche Aufgaben und zu welchem Zeitpunkt eingesetzt werden soll. Hierzu gehören u. a. Aufgaben zur Verwaltung des Technologiebestands wie z. B. das Beherrschen mehrerer Technologien oder die kontinuierliche Unterstützung des laufenden Einsatzes und Betriebs der Technologien.

Diese Aufgaben werden in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus einer Technologie durchgeführt.

3.1.2 Prozessmodelle des Technologiemanagements zur Beherrschung der Technologieänderung

In nicht marktorientierten Unternehmen laufen die Prozesse des Technologiemanagements i. d. R. sequenziell ab. Nachdem die Forschungs- und Entwicklungsabteilung auf eine neue Idee stößt, wird ein erstes Produktkonzept erarbeitet. Dann erstellt die Konstruktionsabteilung nach diesen ersten Unterlagen einen Produktentwurf. Anschließend produziert die Fertigung das Produkt nach dem Entwurf, und abschließend versucht der Vertrieb, das neue Produkt zu vermarkten. Bei dieser Vorgehensweise ist der Misserfolg vorprogrammiert [WIT96a, WIT96b]. Es ist nämlich ein Erzeugnis mit einem hohen Aufwand produziert worden, welches sich häufig nicht erfolgreich vermarkten lässt. Die Hauptgründe hierfür sind zum Ersten die funktionsorientierte Entwicklung des Produkts, ohne die tatsächlichen Kundenanforderungen zu berücksichtigen, und zum Zweiten der sequenzielle Ablauf der Prozesse des Technologiemanagements. Deshalb ist ein interdisziplinäres Prozessmodell für das Management dieser einzelnen Aufgaben erforderlich. Viele Unternehmer und Forscher haben diesen Bedarf erkannt und verschiedene Modelle erarbeitet. In der einschlägigen Literatur werden zahlreiche aus dem deutschsprachigen [PLE96, BRO99, WIT01, THO03, VAH05] sowie englischsprachigen [COO02, ULR04] Raum stammende Prozessmodelle beschrieben, die zum Zwecke der Planung und Steuerung neuer Technologien entwickelt wurden.

Die NASA entwickelte in den 1960er Jahren in den USA den sogenannten Stage-Gate-Prozess, der später von vielen Firmen wie z. B. Hewlett Packard als Managementwerkzeug zur Standardisierung der Zusammenarbeit mit Zulieferern verwendet wurde [COO94]. Die erste Generation dieses Modells hieß „Phase-Review-Processes“ und wurde in die vier Phasen *Konzept-*, *Definitions-*, *Implementierungs-* und *Fertigungsphase* unterteilt. Nach Abschluss jeder Phase erfolgte ein „Management Review“, um über die Aufnahme der nächsten Phase zu entscheiden. Das Prozessmodell war stark technologieorientiert und betrachtete keine Betriebswirtschafts- oder Marketingaktivitäten. Deshalb wurde das Modell von Cooper [COO94, COO02] zum sogenannten „Stage-Gate-Prozess“ weiterentwickelt. Das Stage-Gate-Prozess-Modell ist interdisziplinär und

integriert alle beteiligten Funktionen wie z. B. Marketing oder Produktion. Ausgehend von einer Idee, durchlaufen die Prozesse des Technologie- und Innovationsmanagements die fünf Stufen *vorläufige Bewertung, Definition, Entwicklung, Validierung* und *Vermarktung*. Bei der ersten Stufe erfolgt eine schnelle, nicht teure Bewertung der technischen Leistung des durchzuführenden Projekts sowie dessen Marktperspektiven. Die zweite Stufe ist die kritischste während des gesamten Prozesses und für die Weiterverfolgung der Idee entscheidend [COO02a, COO02b]. Hier wird, zusätzlich zur Definition des Produkts bzw. der neuen Technologie und des Projekts, das Projekt gerechtfertigt und der Projektplan erstellt. Während der Entwicklungsphase werden die in der zweiten Stufe erstellten Pläne konkretisiert. Die Fertigung wird anschließend entworfen, die Markteinführung sowie die Durchführungspläne entwickelt und die Erprobungspläne für die nächste Stufe definiert. Zweck der vierten Stufe ist die Validierung der bereits durchgeführten Tätigkeiten des Technologiemanagements. Hierbei sind Produkt bzw. Technologie, Produktionsprozesse und -verfahren, Aufnahmebereitschaft seitens der Kunden sowie die Wirtschaftlichkeit des Projekts betroffen. In der Vermarktungsphase geht es abschließend um den Start der Großserienfertigung und die wirtschaftliche Vermarktung des neuen Produkts bzw. der neuen Technologie.

Zwischen jeweils zwei Stufen sieht das Prozessmodell nach Cooper eine Schranke bzw. ein Tor (im Englischen als „Gate“ bezeichnet) vor. Alle Gates besitzen die gleiche Struktur: Eingangsdaten für die Revision der abgeschlossenen Phase (Gate-Review), Kriterien für die Bewertung der abgeschlossenen Arbeit und Ausgangsdaten zur Entscheidung der Aufnahme der nächsten Phase. Für jede Stufe bzw. Stufenschranke sind die Eingangsdaten sowie Kriterien im Vorfeld klar zu definieren. Sie berücksichtigen hauptsächlich die technische sowie wirtschaftliche Realisierung der Idee.

Ein weiteres Prozessmodell, welches dem Stage-Gate-Prozess-Modell ähnelt, ist das Prozessmodell von Ulrich und Eppinger [ULR04]. Ulrich und Eppinger untergliedern den Prozess des Technologiemanagements in die fünf Phasen *Konzeptentwicklung, Design der Systemebene, detailliertes Design, Erprobung und Verfeinerung* sowie *Produktionshochlauf*. Der Eingang zum Prozess ist eine Idee, Innovation oder Zielsetzung, und der Ausgang bzw. das Ergebnis ist die Markteinführung des resultierenden neuen Produkts bzw. der neuen Technologie. In der Konzeptentwicklungsphase wird zuerst der Bedarf des gezielten Markts identifiziert. Dann werden alternative Produkt- bzw. Technologiekonzepte generiert und evaluiert. Anschließend wird daraus ein Einzelkonzept zur Weiterentwicklung selektiert. Ein Konzept bedeutet eine Beschreibung der Form, Funktion und Eigenschaften des Produkts bzw. der Technologie und ist i. d. R. begleitet von einer Reihe von Spezifikationen. Diese umfassen eine Analyse der konkurrierenden Produkte bzw. Technologien und eine wirtschaftliche Rechtfertigung des Innovationsprojekts. Die Phase zum Design der Systemebene beinhaltet zum einen die Definition der Produktarchitektur und die Produktunterteilung in Subsysteme und Komponenten und zum anderen den Entwurf für die Produktionssysteme. Ergebnisse dieser Phase sind ein geometrisches Layout des Produkts, eine funktionale Spezifikation der Subsysteme und ein vorläufiges Flussdiagramm zur Endmontage des Produkts. Handelt es sich dabei um die Entwicklung einer neuen Technologie, so werden statt Subsystemen Technologiestufen definiert. Während der Phase des detaillierten Designs werden die Spezifikationen der Produktgeometrie, -materialien und -toleranzen

detailliert. Es wird dabei entschieden, welche Komponenten gekauft und welche gefertigt werden. Im Falle einer Technologie werden die genauen technologischen Parameter wie z. B. Temperatur, Kraft oder Betriebsmittel festgelegt. In der Erprobungs- und Verfeinerungsphase werden Testläufe gestartet und Prototypen hergestellt. Es werden i. d. R. verschiedene Fertigungsszenarien mit unterschiedlichen technischen Parametereinstellungen durchgeführt. Abschließend erfolgt die Phase des Hochlaufs, in der die Frühphasenfertigung evaluiert wird und die ersten Produkte i. d. R. an vorzugsberechtigte Kunden geliefert werden.

Ähnlich wie beim Prozessmodell nach Cooper zeigt Brockhoff [BRO99] in seinem Modell die Möglichkeit eines Abbruchs der Prozesse des Technologiemanagements infolge eines technischen oder ökonomischen Misserfolgs oder aufgrund der Verwerfung einer Idee explizit auf. Brockhoff stellt kein exaktes Ablaufschema dar, vielmehr zeigt er sowohl die Vorgänge und die Tätigkeiten (z. B. Forschung und Entwicklung oder Investition) als auch deren Ergebnisse.

In seinem Prozessmodell betont Witt [WIT96a, WIT96b] die Forderung nach einer marketingorientierten, funktionsübergreifenden und teambezogenen Produkt- bzw. Technologieentwicklung. Basierend auf diesen Überlegungen definierte er die folgenden Kernstufen. Der Prozess des Technologie- und Innovationsmanagements beginnt mit der *Festlegung des Suchfelds*. Durch eine sinnvolle Definition von Suchfeldern wird die realistische Entwicklung einer neuen Idee erreicht. Der ersten Aufgabe folgt die *Ideengewinnung*, in der möglichst viele Ideen zusammengetragen werden. Dann erfolgt die Prozessstufe *Rohentwurf für Produktkonzept*. Hierbei ist zu beraten, ob und in welche marktfähigen Produktkonzepte sich die gewonnenen Ideen umsetzen lassen. In dem folgenden Schritt *Grobauswahl mit Eignungsanalyse* werden die verschiedenen Produktideen im Hinblick auf ihre Realisierbarkeit im Unternehmen geprüft und im anschließenden Schritt *Feinauswahl mit Rentabilitätsanalyse* ökonomisch bewertet. Wenn dieser Prüfvorgang erfolgreich durchgeführt wird und ein positives Ergebnis liefert, wird in der Phase *Technische Entwicklung* das Produkt nach Festlegung seiner Eigenschaften und Funktionalitäten technisch entwickelt. Parallel zu dieser Stufe erfolgt die *Entwicklung des Marketing-Konzepts.* Hierbei erarbeitet die Marketingabteilung in Koordination mit der Technik ein Vertriebskonzept. Außerdem wird das Produkt in dieser Phase marktreif gemacht, indem Produktmengen, Qualität, Verpackung und Produktpreis festgelegt werden. Besteht das neue Produkt die Stufe *Durchführung von Markttests*, beginnt die abschließende Phase *Markteinführung*.

Vahs und Burmester erweitern in ihrem Prozessmodell alle Phasen des Technologiemanagements um ein umfassendes Innovationscontrolling. Bei beiden Autoren beginnt der Innovationsprozess mit dem *Innovationsanstoß*, der eine Diskrepanz zwischen dem Ist-Zustand aus einer im Vorfeld durchgeführten Situationsanalyse und dem Soll-Zustand darstellt. Der Soll-Zustand resultiert dabei aus den Unternehmensstrategien, sei es das Streben nach Technologie- oder Marktführerschaft. Somit ist der Innovationsanfang das erkannte Problem aus der Soll-Ist-Abweichung. Nach der Problemidentifizierung folgt die Phase der *Ideengenerierung*. Hier werden gezielte Maßnahmen zur Gewinnung von Problemlösungsvorschlägen erarbeitet. Dabei wird zwischen Ideensammlung und -generierung unterschieden. Gewonnene Ideen werden anschließend

systematisch erfasst und gespeichert. Weil während der Ideengewinnung auch Vorschläge für andere, teilweise alte Problembereiche entstehen, schließt sich an die Ideenerfassung das sogenannte *Screening* an. Aufgabe des Screenings ist das Fokussieren auf die tatsächliche Problemstellung.

In der dritten Phase des Innovationsprozesses erfolgt eine *Bewertung* der entstandenen Ideen, bevor in der folgenden Prozessstufe eine *Auswahl* durchgeführt wird. Nach Vahs und Burmester endet der Innovationsprozess mit der *Umsetzung* und der *Markteinführung*. Als phasenübergreifenden Querschnittsprozess bauen die Autoren ein *Controlling-System* auf. Das Controlling dient dazu, in einer zentralen Form die Planung, Steuerung, Koordination und Kontrolle der unterschiedlichen Stufenaktivitäten des Technologiemanagements systematisch und zielorientiert durchzuführen [VAH05].

3.1.3 Anwendung von Lebenszyklusmodellen zur Beschreibung der Technologieänderung

Der Technologielebenszyklus (TLZ) ist die Abbildung des idealtypischen Entwicklungsverlaufs einer Technologie und dient als Instrument zur Abschätzung des Technologieentwicklungspotenzials [HAU04, PFE91]. Der TLZ zeigt den Zusammenhang zwischen einer unabhängigen Variable und den von ihr abhängigen Größen der Technologieentwicklung. Als unabhängige Variable kommt i. d. R. die Zeit in Betracht. Als abhängige Größe der Technologieentwicklung wird die Häufigkeit der Anwendung, das Integrationsmaß in realisierte Produkte und Prozesse, das gesamte Ausmaß der Forschungs- und Entwicklungsaktivität aller Unternehmen im jeweiligen Technologiefeld oder eine entsprechende Patentkennzahl dargestellt [HAU04].

In der Literatur ist die Darstellung des Technologielebenszyklus nicht einheitlich präsentiert. Es existieren zahlreiche Modelle, die sich entweder nach Form der Kurve oder Anzahl der Phasen eines Technologielebenszyklus unterscheiden. Die bekanntesten und am weitesten verbreiteten Modelle werden im Folgenden näher beschrieben.

3.1.3.1 Modell nach Arthur D. Little

Die Beratungsfirma Arthur D. Little modelliert den Technologielebenszyklus durch die Darstellung des Grades der Erreichung des Wettbewerbspotenzials in Abhängigkeit von der Zeit. Dabei unterscheidet sie zwischen den vier Phasen Entstehung, Wachstum, Reife und Alter [LIT86, LIT87]. Demnach durchlaufen nicht alle Technologien den gesamten Lebenszyklus, sondern sie können wegen fehlender Wettbewerbsbedeutung verdrängt oder aufgegeben werden. Bild 3-1 zeigt den qualitativen Verlauf des Technologielebenszyklus nach Little.

In der Entstehungsphase werden die Technologien häufig *Schrittmachertechnologien* genannt. Dies sind i. d. R. innovative Technologien mit einem großen technologischen und wirtschaftlichen Potenzial. Sie öffnen den Fortschritt mit Aufschwung und entwickeln sich im Laufe der Zeit dadurch zu *Schlüsseltechnologien*, dass sie den Markterfolg bestimmen und sichern. Während der Reife- und Altersphase erreichen die Technologien die perfekte Beherrschung der Funktion und werden *Basistechnologien* genannt [ZAH95, BUL94].

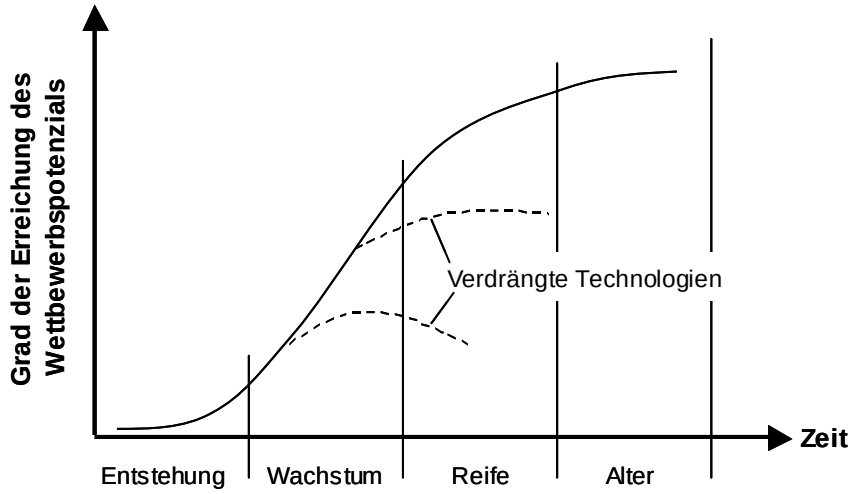


Bild 3-1: Technologielebenszyklus nach Arthur D. Little [LIT86]

Obwohl nicht genau erklärt wird, wie bzw. anhand welcher Dimension (Prozentwerte, absolute oder kumulierte Werte usw.) der Verlauf des Technologielebenszyklus bestimmt wird, definiert das Modell diverse qualitative Faktoren zur Charakterisierung der einzelnen Phasen. Diese Faktoren sind in der folgenden Tabelle 3-1 genauer dargestellt.

Tabelle 3-1: Indikatoren für die Lebenszyklusphasen einer Technologie [LIT97]

	Entstehung	Wachstum	Reife	Alter
Unsicherheit über technische Leistungsfähigkeit	Hoch	Mittel	Niedrig	Sehr niedrig
Investitionen in Technologieentwicklung	Niedrig	Maximal	Niedrig	Vernachlässigbar
Breite der potenziellen Einsatzgebiete	Unbekannt	Groß	Etabliert	Abnehmend
Typ der Entwicklungsanforderungen	Wissenschaftlich	Anwendungsorientiert		Kostenorientiert
Auswirkungen auf Kosten-Leistungs-Verhältnis	Sekundär	Maximal	Marginal	Marginal
Zahl der Patentanmeldungen / Typ der Patente	Zunehmend Konzeptpatente	Hoch produktbezogen	Abnehmend verfahrensbezogen	
Zugangsbarrieren	Wissenschaftliche Fähigkeiten	Personal	Lizenzen	Know-how

Verfügbarkeit	Sehr beschränkt	Restrukturierung	Marktorientiert	Hoch

3.1.3.2 Technologielebenszyklus nach Ford und Ryan

Ein weiteres Technologielebenszykluskonzept ist das Sechs-Phasen-Modell von Ford und Ryan [FOR81]. In diesem Konzept wird der Ausbreitungsgrad der Technologie als Funktion der Zeit qualitativ dargestellt.

Das Modell wird in der Literatur verwendet, um Fragestellungen des Technologietransfers wie z. B. Zeitpunkt eines Know-how-Verkaufs oder daraus resultierende Wettbewerbsprobleme zu diskutieren [FOR83, HÖF92, HAU04]. Bild 3-2 zeigt den qualitativen Verlauf des Technologielebenszyklus und verdeutlicht die unterschiedlichen Phasen.

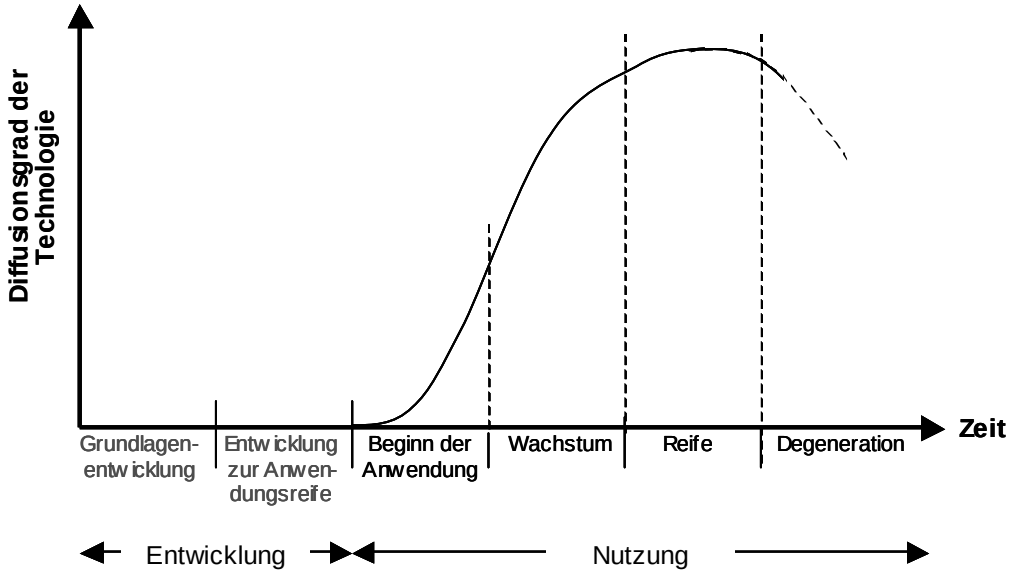


Bild 3-2: Der Technologielebenszyklus nach Ford und Ryan [FOR83]

In der ersten Phase *Grundlagenentwicklung* prüft ein Unternehmen, ob der Einsatz einer neuen Technologie prinzipiell mit seinen Zielen, Strategien und Ressourcen übereinstimmt. Erst dann kann die Weiterentwicklung der Technologie durchgeführt werden. Dies erfolgt entweder unternehmensintern oder in Form von Kooperationen und beruht auf Ergebnissen einer Grundlagenforschung. Am Beginn der zweiten Phase *Entwicklung zur Anwendungsreife* wird entschieden, eine neue Technologie bei einem Produkt oder Verfahren einzusetzen. Bei dieser Entscheidung spielen die damit verbundenen Kosten eine wichtige Restriktion.

Die Phase *Erstanwendung der Technologie* (Beginn der Anwendung) bedeutet die Einführung des neuen Produkts oder Verfahrens in den Markt. Unternehmen entwickeln i. d. R. während dieser Phase die Technologie weiter. Eine *wachsende Technologieanwendung* entspricht einer steigenden Zahl von Anwendungsbereichen. Eine mögliche Standardisierung der Technologie kann hier von großer Bedeutung werden. Der Marktwert der neuen Technologie erreicht in dieser Phase sein Maximum [HÖF92], da

das Wachstumspotenzial der Technologie noch bevorsteht. Wird die Technologie sowohl vom Erstentwickler als auch von den Nutzern beherrscht, so ist die Rede von der *Technologiereife*. In der letzten Phase des Technologielebenszyklus *Technologie-Rückgang* (bzw. Degeneration) sind die Entwicklungsfähigkeit und die Einsatzpotenziale der Technologie erschöpft. In diesem Stadium wird die Technologie durch eine innovativere abgelöst.

3.1.3.3 S-Kurven-Konzept nach McKinsey

Das vom Beratungsunternehmen McKinsey entwickelte S-Kurven-Konzept stellt eine spezielle Darstellungsform von TLZ-Verläufen dar. Dabei werden im Gegensatz zu den anderen Modellen verschiedene Lebenszyklusfunktionen kumuliert abgebildet.

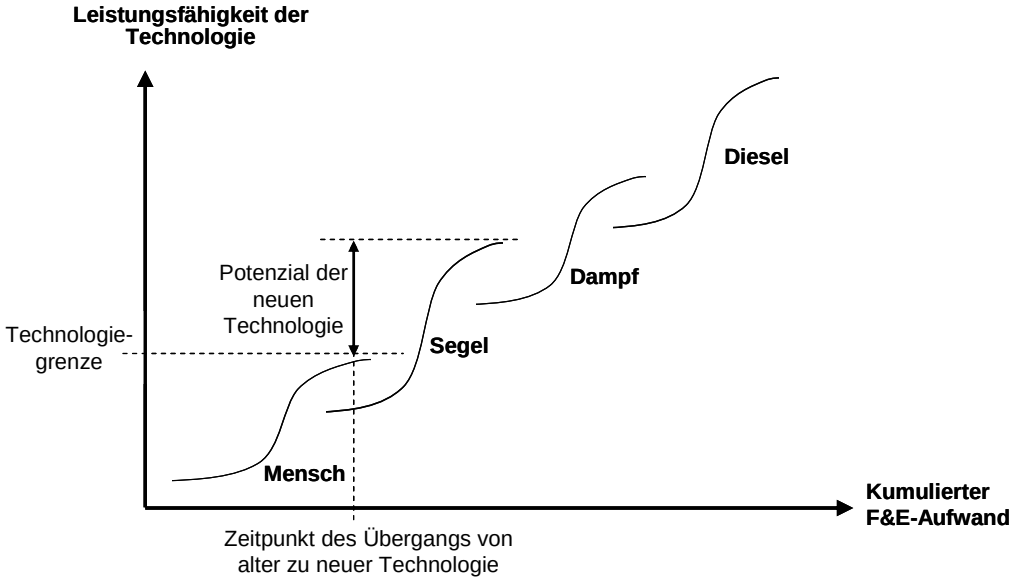


Bild 3-3: S-Kurven-Konzept am Beispiel des Schiffsantriebs [WEL02]

Die S-Kurve stellt die Leistungsfähigkeit bzw. das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Technologie dem kumulierten F&E-Aufwand gegenüber. Der kumulierte F&E-Aufwand beinhaltet dabei indirekt den Faktor Zeit [FOS82, KRU82]. Das noch auszuschöpfende Potenzial einer Technologie lässt sich durch die Differenz zwischen dem Stand zum Betrachtungszeitpunkt und der technischen Leistungsgrenze ermitteln. Die Produktivität sinkt mit steigender Reife der Technologie. Immer mehr F&E-Aufwand muss daher aufgewendet werden, um eine weitere Steigerung der Leistungsfähigkeit zu erreichen. Erzielen jedoch F&E-Mittel nur marginale Leistungsverbesserungen, so bedeutet dies, dass die Technologie ihren höchsten Reifegrad und somit ihre technische Grenze erreicht hat. Dies ist i. d. R. ein Indiz dafür, dass ein Übergang zu einer neuen Technologiegeneration bevorsteht, die zum Ablösen der bisherigen Technologie führt. Bild 3-3 erläutert das S-Kurven-Konzept am Beispiel der Schiffsantriebsentwicklung von der menschlichen Leistung über Segeln und Dampfantrieb bis hin zum Einsatz von Dieselmotoren [WEL02].

3.1.4 Diskussion der Einsatzfelder und Anwendungen

Obwohl sich die zahlreichen Prozessmodelle zum Technologiemanagement in den Details unterscheiden, definieren sie die gleichen Kernaufgaben. Ausgehend von der Definition des Begriffs *Innovation* definieren die Autoren die unterschiedlichen Phasen *Ideengenerierung, Ideenakzeptierung* und *Ideenrealisierung*. Dabei wird hauptsächlich eine neue Technologie als Innovationsanstoß gesehen. Die verschiedenen Phasen des Technologiemanagements zielen somit in erster Linie darauf ab, die Innovation technologisch zu realisieren, die neue Technologie erfolgreich abzusetzen und ihre Akzeptanz im Markt zu kontrollieren.

Eine Betrachtung der logistischen Verwirklichung einer neuen Technologie fehlt jedoch in allen präsentierten Prozessmodellen. Es werden verstärkt die technischen und wirtschaftlichen Aspekte der neuen Technologie fokussiert, ohne dabei ihrer logistischen Integration in bestehende Produktionsprozesse Rechnung zu tragen. Die innovative Technologie wird darüber hinaus unabhängig von der abzulösenden betrachtet und in vielen Fällen als Forschung und Entwicklung auf „grüner Wiese“ dargestellt.

In der vorliegenden Arbeit wird dennoch auf der Kernaussage dieser Prozessmodelle aufgebaut. In Abhängigkeit von den Charakteristika der neuen Technologie in ihren verschiedenen Lebenszyklusphasen werden logistische Aufgaben abgeleitet, die für einen erfolgreichen Technologiewandel (von der konventionellen zur innovativen Technologie) bedeutend sind.

Die Modelle zur Beschreibung des Technologielebenszyklus stellen den Entwicklungsverlauf der Technologie im Laufe der Zeit dar und präsentieren ihr Entwicklungspotenzial. Sie definieren die verschiedenen Phasen des Lebenszyklus und beschreiben sie qualitativ aus technischer und wirtschaftlicher Sicht. Ähnlich wie bei den Prozessmodellen zum Technologiemanagement werden die logistischen Aspekte kaum betrachtet. Ein Zusammenhang zwischen den einzelnen Lebenszyklusphasen und den logistischen Aufgaben fehlt in allen Beschreibungsmodellen. Bis auf das S-Kurven-Modell wird des Weiteren die neue Technologie separat beschrieben, ohne den Zusammenhang zur alten Technologie darzustellen. Deshalb wird in dieser Arbeit weiter auf dem S-Kurven-Modell aufgebaut, welches zusätzlich zu den einzelnen Phasen des Technologielebenszyklus das technische Potenzial der neuen Technologie gegenüber der abzulösenden abbildet und somit den Bedarf für eine Technologieänderung zeigt.

In Kapitel 5 werden die einzelnen Technologieentwicklungsphasen aus logistischer Sicht beschrieben und relevante logistische Aufgaben definiert. Diese werden mit den Hauptphasen des Technologiemanagements verknüpft, um daraus ein Prozessmodell zum simultanen logistischen, technischen und wirtschaftlichen Technologiemanagement abzuleiten.

3.2 Anlaufmanagement

Aus einer Technologieänderung resultiert der Hochlauf einer neuen Technologie. Für die Planung und Steuerung eines Hochlaufs existieren zahlreiche Ansätze zum Anlaufmanagement. Diese werden im Folgenden beschrieben.

3.2.1 Grundlagen des Anlaufmanagements

Das Anlaufmanagement umfasst die Koordination aller Aktivitäten im Zeitraum der Erstellung erster physischer Prototypen bis zur Produktion kundenfähiger Produkte mit dem Fokus auf die logistischen Anforderungen in der Serienfertigung.

Das Anlaufmanagement definiert den Anfang des Produktlebenszyklus [SCH05b] und zielt hauptsächlich darauf ab, die termingerechte Verfügbarkeit aller Bauteile für den Serienanlauf eines Produktes sicherzustellen, den Serienanlauf zu verkürzen, die Situation der Termine sowie den Reifegrad des Produktes transparenter zu gestalten und die Anlaufkosten auf ein Minimum zu reduzieren.

Die einzelnen Entwicklungs- bzw. Projektphasen des Anlaufmanagements werden in eine Anlaufkurve übertragen (Bild 3-4).

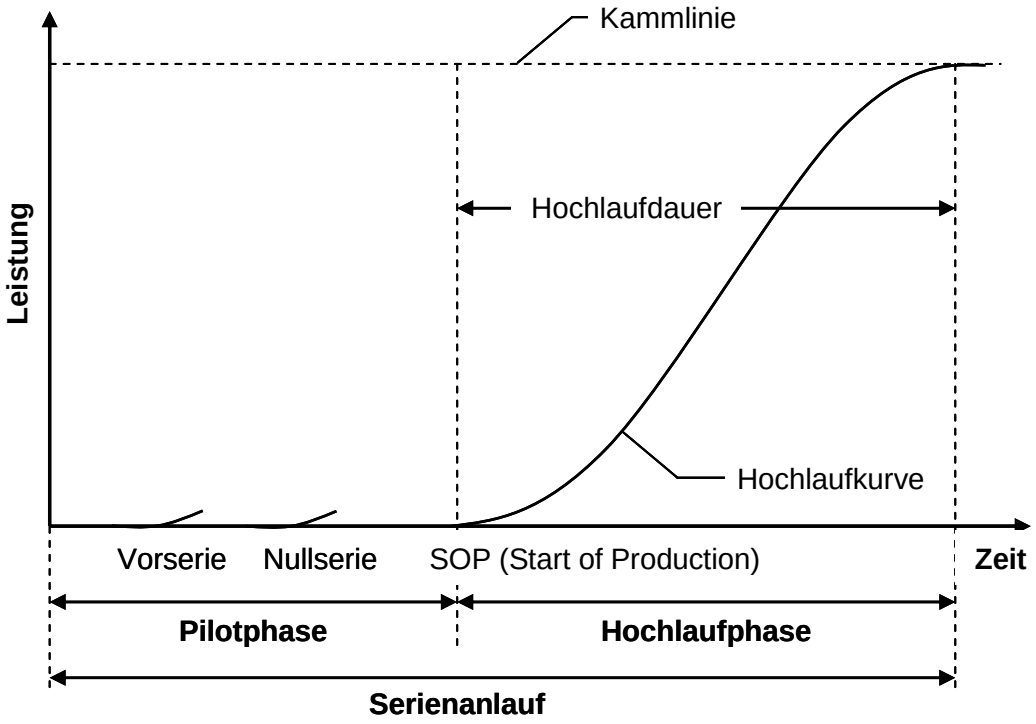


Bild 3-4: Arbeitsfeld und Kurve des Anlaufmanagements

Das Anlaufmanagement beinhaltet neben dem Arbeitsfeld *Infrastrukturaufbau* (von der Produktfreigabe bis zur Vorserie) die *Pilot-* und *Hochlaufphase*. Die Pilotphase beginnt unmittelbar nach dem Infrastrukturaufbau und erstreckt sich von der *Vorserie* über die *Nullserie* bis zum *Start of Production* (SOP). Die Hochlaufphase beginnt mit der Produktion des ersten Erzeugnisses (SOP) und dauert bis zum Erreichen der *Kammlinie*. In allen Phasen zielt das Anlaufmanagement auf eine optimale Produktqualität sowie auf verkürzte Entwicklungs- und Fertigungszeiten. Dabei wird ständig ein optimaler Übergang von der Entwicklungsphase bis zur prozesssicheren Erreichung der Sollausbringungsmenge (Kammlinie) angestrebt.

3.2.2 Anlaufmanagement zur Beherrschung neuer Technologien

Der wissenschaftlichen Behandlung des Produktionsanlaufs kommt insbesondere in der jüngsten Vergangenheit vermehrte Bedeutung zu. In der einschlägigen Literatur sind zahlreiche Anlaufstandards, Strategiemodelle, Werkzeuge und Methoden zur zielorientierten Verringerung der Anlaufzeit und -kosten und zur Beherrschung der Anlaufkomplexität zu finden. Dabei werden organisatorische, monetäre, technische sowie qualitative Aspekte betrachtet [FLE04, KUH02, SCH04a, SCH04b, URB04, WIL04].

Wiendahl, Hegenscheidt und Winkler [WIE02c] betonen, dass beim Anlauf von Produktionssystemen u. a. die späteren Phasen des Anlaufs von vielen Störeinflüssen negativ beeinflusst werden und demzufolge durch eine hohe Planungsunsicherheit gekennzeichnet sind. Die Autoren stellen das Problemfeld und die Zielgrößen dar, definieren die entscheidenden Phasen und skizzieren mögliche Handlungsfelder, auch „Road Maps“ genannt, um anlaufrobuste und fehlerresistente Produktionssysteme zu realisieren. Zum Ausgleich der nicht zu verhindernden Störungen werden darüber hinaus Reaktionsstrategien etabliert.

Um die Anlaufprozesse zu beherrschen, fokussieren Spath, Fleischer und Lanza auf die Qualitätsbeherrschung [SPA03]. Sie entwickelten ein Lösungskonzept, welches mit Hilfe der Qualitätssimulation einen beherrschten Wechsel eines Produktionssystems in einen neuen Serienbetriebszustand erlaubt. Des Weiteren wird anhand der Materialflusssimulation das Produktionssystem bereits in frühen Phasen des Anlaufs modelliert, simuliert und zielentsprechend gestaltet.

Risse sieht den Produktentstehungsprozess und die damit verbundenen Zeittreiber als Ansatzpunkt zur Steigerung der Prozesseffektivität und -effizienz [RIS02, RIS03]. In diesem Zusammenhang unterteilt er den Produktentstehungsprozess in Teilprozesse. Er stellt den Gesamtprozess in Form einer linearen Abfolge der Teilprozesse und einer sequenziellen Abarbeitung der einzelnen, logistisch aufeinander aufbauenden Prozessschritte dar. Um den Anlauf zu beherrschen, zielt der Autor auf eine effiziente Verkürzung der sogenannten Time-to-Market ab.

Einen weiteren Ansatz zur Beherrschung anlaufender Prozesse zeigen Housein, Lin und Wiesinger [HOU02]. Sie sehen in dem Mitarbeiter den Garanten für einen beherrschten, schnellen Produktionsanlauf. Deshalb befassten sie sich mit dem Handlungsfeld „Wissensmanagement und Qualifizierung des Anlaufpersonals“.

3.2.3 Diskussion der Einsatzfelder und Anwendungen

Die Methoden und Prozessmodelle des Anlaufmanagements sehen den Serienanlauf als entscheidende Schlüsselstelle innerhalb der Produktentstehung, wovon der Erfolg einer Produktentstehung maßgeblich beeinflusst wird. Deshalb zielen die Autoren darauf ab, die Produktionsanläufe bei einer permanenten Verringerung der Planungs- und Realisierungskosten deutlich zu verkürzen.

Dabei stehen die logistischen Prozesse im Mittelpunkt. Es wird stets danach gestrebt, anlaufrobuste Produktionssysteme zu gestalten, die einfach und übertragbar sind. Die Prozessinformationen werden standardisiert und mit den Produktdaten verknüpft, um

somit die Auswirkungen von Produkt- oder Prozessänderungen auf die Produktionssysteme frühzeitig zu erkennen und bewerten.

Für die Planung und Steuerung der Produktionsprozesse bei einer Technologieänderung können die Methoden des Anlaufmanagements übernommen werden, obwohl sie sich mehr auf den Anlauf neuer Produkte als auf den neuer Technologien fokussieren. Hierfür müssen die Zusammenhänge zwischen den relevanten Aspekten einer Technologieänderung und den einzelnen Aufgaben des Anlaufmanagements identifiziert werden.

3.3 Logistische Kennlinien

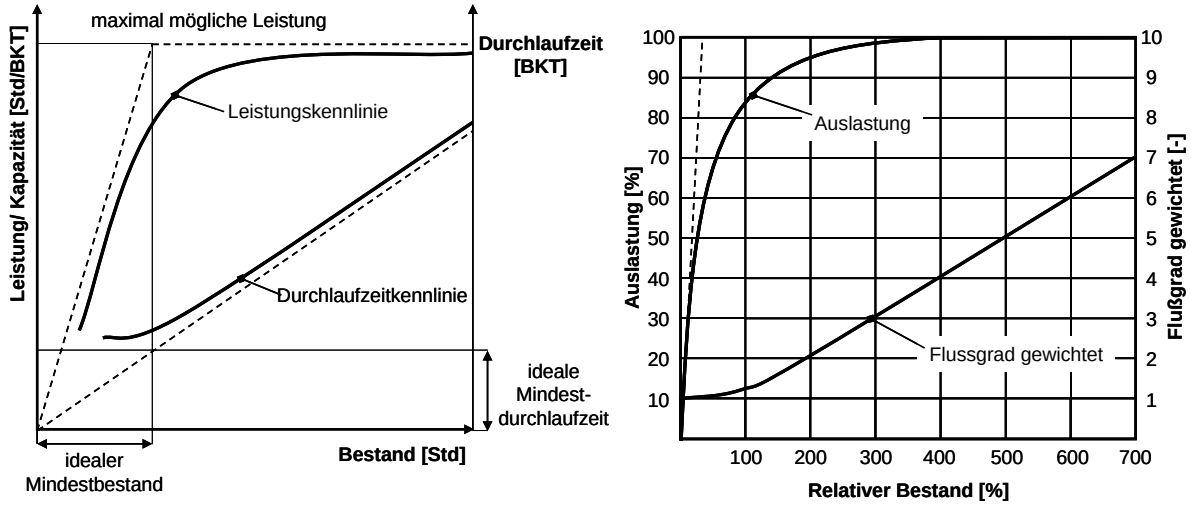
Die Implementierung einer neuen Technologie erzwingt die Gestaltung der entsprechenden Produktionssysteme. Neben der Layoutstrukturierung ist die logistische Dimensionierung dieser Systeme betroffen. Die logistischen Betriebskennlinien stellen ein hierfür geeignetes Modell dar.

3.3.1 Grundlagen der logistischen Kennlinien

Ein Erklärungsmodell zum Abbilden der dynamischen Zusammenhänge zwischen den logistischen Zielgrößen stellen die von Nyhuis und Wiendahl entwickelten logistischen Kennlinien dar [NYH03]. Sie verdichten verschiedene stationäre Betriebszustände eines Arbeitssystems. Es ist zwischen Produktions-, Transport- und Lagerkennlinien zu unterscheiden.

Die *Transportkennlinien* weisen hinsichtlich der Kurvenverläufe eine sehr ähnliche Charakteristik wie die Produktionskennlinien auf und werden an dieser Stelle nicht vertieft beschrieben. Mit den *Lagerkennlinien* werden Lagerverweilzeit, Lieferverzug sowie Servicegrad [NYH03, LUT02] über dem Bestand grafisch dargestellt. Die Lagerkennlinien werden von allen Größen beeinflusst, die auf das Lagerzugangs- bzw. Lagerabgangsverhalten wirken.

Die Produktionskennlinien (s. Darstellung (a) in Bild 3-5), die auch Betriebskennlinien genannt werden [BEC84, NYH91, WIE93, WIE97], zeigen, dass die mittlere Durchlaufzeit an einem Arbeitssystem proportional mit zunehmenden mittlerem Bestand steigt. Jedoch kann sie eine untere Grenze nicht unterschreiten, die aus der technisch bedingten Bearbeitungs- und ggf. der Transportzeit zwischen zwei Arbeitssystemen resultiert. Aus kurzen Durchlaufzeiten resultiert eine hohe Planungssicherheit, die wiederum zur Erhöhung der Termintreue führt [NYH03]. Die Leistungskennlinie hingegen zeigt, dass die mittlere Leistung des Arbeitssystems bei hohen Beständen bestandsunabhängig bleibt, weil das Arbeitssystem seine maximale Kapazität erreicht hat. Beim Unterschreiten eines bestimmten mittleren Bestands dagegen treten Leistungseinbußen auf, weil der Materialfluss zeitweilig abreißt und somit der Arbeitsvorrat fehlt. Bei der grafischen Darstellung der Produktionskennlinien wird der Bestand i. d. R. in Vorgabestunden gemessen, die Durchlaufzeit in Betriebskalendertagen und die Leistung in Stunden pro Betriebskalendertag.



a) Reale Produktionskennlinien **b) Normierte Produktionskennlinien**

Bild 3-5: Reale und normierte Produktionskennlinien [NYH03]

Um unterschiedliche Systeme miteinander vergleichen zu können, ist eine Normierung der Produktionskennlinien notwendig. Die Darstellung (b) auf der rechten Seite von Bild 3-5 zeigt die normierten Produktionskennlinien. In diesem Fall werden der Bestand und die Leistung auf den idealen Betriebszustand bezogen, der durch den idealen Mindestbestand und die maximal mögliche Leistung gekennzeichnet wird [NYH03]. Diese Größen werden daher prozentual ausgedrückt, relativ zum idealen Mindestbestand bzw. zur maximal möglichen Leistung. Daraus resultieren der relative Bestand, die mittlere Auslastung und die daraus abgeleitete Auslastungskennlinie. Die Durchlaufzeitkennlinie wird dagegen durch die Flussgradkennlinie ersetzt. Der Flussgrad wird dabei als Quotient aus der mittleren Durchlaufzeit und der mittleren Durchführungszeit definiert.

Die logistischen Kennlinien entwickelten sich von einem reinen Erklärungsmodell zu einem Controlling-Ansatz zur Beherrschung der logistischen Abläufe. Hierzu sind zahlreiche Arbeiten [WIE93, JÄG00, LUT02, WIE02, YU01, NYH04] entstanden.

Nyhuis und Wiendahl ziehen die Betriebskennlinien zur Bewertung von Fertigungsabläufen im Rahmen eines Monitorings [WIE93] heran. Sie zeigen damit, welche Durchlaufzeiten und Bestände in den vorliegenden strukturellen Bedingungen hätten erreicht werden können, ohne dass Materialflussabrisse und die damit verbundenen Leistungseinbußen zu erwarten gewesen wären. Des Weiteren zeigen sie, wie anhand der Betriebskennlinien Plandurchlaufzeiten und andere Steuerungsparameter differenziert ermittelt werden können. Darüber hinaus werden Konsequenzen bei einer Parameterveränderung im Hinblick auf die logistischen Zielgrößen aufgezeigt.

Darauf basierend hat Jäger [JÄG00] seine Arbeit entwickelt. Er erarbeitete ein kennliniengestütztes Konzept zur Konfiguration der relevanten logistischen Parameter in standardisierten Informationssystemen zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS-) bzw. zum Enterprise Resource Planning (ERP-System). Die relevanten, zu konfigurierenden PPS-Parameter sind nach Jäger die Plan-Auftragsdurchlaufzeit, die verfügbare Kapazität und die Produktionsauftragsmenge. Durch eine sinnvolle Konfiguration dieser

Parameter verspricht sich der Autor eine Steigerung der Planungsqualität und der Prozesseffizienz und somit eine logistische Beherrschung der Fertigungsabläufe.

Das Konzept wurde abschließend als Assistenzsystem implementiert, welches keineswegs das PPS- bzw. ERP-System ersetzt, sondern dessen Parametrierung in Form eines Add-on unterstützt.

Ferner wurden die Kennlinien für die Darstellung des Zusammenhangs zwischen der Termintreue und dem mittleren Bestand weiterentwickelt [YU01, NYH04]. Yu entwickelte die sogenannte Terminkennlinie mit dem Ziel, die Lieferfähigkeit und Liefertreue eines Unternehmens zu beherrschen. Die entwickelte Terminkennlinie unterstützt den Fertigungsplaner beim Vorhersehen der zu erwartenden Terminabweichung und der zu erwartenden Termintreue auf der Grundlage der Einzelprozesse sowie beim Ableiten von Verbesserungsmaßnahmen. Des Weiteren ermöglicht die Terminkennlinie, in Verbindung mit den Betriebskennlinien, die zielorientierte Abstimmung der logistischen Zielgrößen Durchlaufzeit, Leistung, Bestand und Termintreue.

3.3.2 Anwendung der logistischen Kennlinien bei einer Technologieänderung

Neben der Verbesserung technologischer Aspekte wie z. B. der Maßgenauigkeit oder Oberflächenqualität der Erzeugnisse beeinflusst eine neue Technologie in der Regel auch die Logistikleistung. Die logistischen Produktionskennlinien bieten in diesem Zusammenhang ein geeignetes Modell für die Darstellung der logistischen Potenziale einer neuen Technologie in einer frühen Phase der Technologieeinführung [OUA04, GLE02] (Bild 3-6).

In Bild 3-6 ist ein Arbeitssystem dargestellt, dessen Betriebszustand im Überlastbereich liegt. In diesem Bereich, d. h. ab einem bestimmten Bestandwert, ändert sich die Ausbringung (Leistung) des Arbeitssystems mit steigendem Bestandswert nur noch unwesentlich, der Systembestand erhöht sich jedoch kontinuierlich und die Durchlaufzeit steigt dabei proportional an. Das Arbeitssystem hat zu jeder Zeit ausreichend Arbeit, sodass keine bestandsbedingten Beschäftigungsunterbrechungen auftreten können. Durch eine Reduzierung der Bestände und eine Harmonisierung der Auftragsgrößen sinkt die mittlere Durchlaufzeit bei einer fast konstanten mittleren Leistung. Durch Ergreifen solcher logistischen Maßnahmen verbessert sich die Logistikleistung bis zu einem Grenzwert (*logistische Grenzkapazität*), bei dessen Erreichung diese Maßnahmen keine weiteren Verbesserungen ergeben.

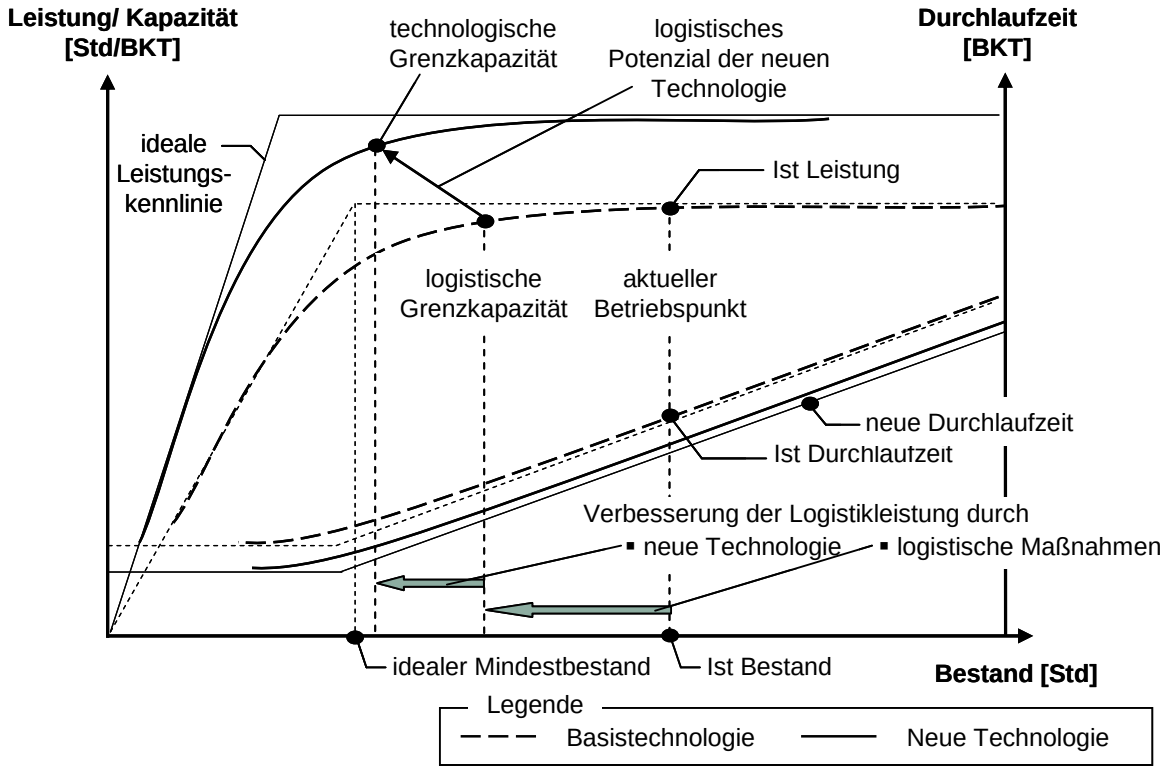


Bild 3-6: Logistisches Potenzial einer neuen Technologie

Um die Leistung des Arbeitssystems weiter zu erhöhen und somit diesen Grenzwert überschreiten zu können, bietet sich die Ablösung der bestehenden Technologie durch eine innovativere Technologie an. Verfügt die neue Technologie über kürzere Bearbeitungszeiten, erreicht das Arbeitssystem eine hohe Leistung bereits bei einem niedrigen Bestandswert und die Durchlaufzeit sinkt dementsprechend. Die Leistungskennlinie konvergiert im Sättigungsbereich früh gegen die ideale Kurve, die die maximal mögliche Leistung darstellt. Diese maximale Leistung hängt neben organisatorischen Aspekten wie z. B. dem Schichtmodell auch wesentlich von der Anlagenverfügbarkeit ab. Deshalb kann eine neue Technologie, die meistens zur Steigerung der Zuverlässigkeit einer Anlage genutzt wird, eine höhere maximal mögliche Leistung erreichen. Hierfür wird vorausgesetzt, dass das produzierende Unternehmen einen höheren Absatz erzielen kann und somit über ein erhöhtes Volumen an Kundenaufträgen verfügt. Die Leistungskennlinie der neuen Technologie verläuft somit über der Kennlinie der abgelösten Technologie. Durch eine schnellere Technologie wird außerdem die Bearbeitungs- und somit die Auftragszeit kürzer, weshalb der ideale Mindestbestand geringer wird. Von diesem Wert hängt die Steigung der Leistungskennlinie im proportionalen Bereich ab. Zusätzlich zum idealen Mindestbestand beeinflusst die Bearbeitungszeit den Verlauf der Durchlaufzeitkennlinie. Abhängig von den beiden Werten entsteht die modifizierte Kurve für die neue Technologie. Die Produktionskennlinien der neuen Technologie und insbesondere die Leistungskennlinie nähern sich bei niedrigen Bestandswerten den idealen Kurven an. Somit kann der Betriebszustand einen höheren idealen Grenzwert (*technologische Grenzkapazität*) als bei der alten Technologie erreichen, wobei sich die mittlere Leis-

tung der maximal möglichen Leistung annähert und sich dabei eine kürzere Durchlaufzeit und ein geringer Bestand einstellen.

Eine solche Modellierung der neuen Technologie sowie deren Vergleich mit der bestehenden Technologie, schon vor der Technologieänderung, zeigen die mit einem möglichen Technologiewechsel verbundenen logistischen Potenziale. Sie geben dem Planer des Weiteren eine Entscheidungshilfe über eine eventuelle Änderung bzw. Anpassung der Absatzplanung. Eine schnellere Technologie ermöglicht einen höheren Absatz, wenn der Marktbedarf für die produzierten Erzeugnisse vorhanden ist. Dies ist z. B. bei Lohnfertigern der Fall. Weil sich produzierende Unternehmen verstärkt auf ihre Kernkompetenzen fokussieren und immer mehr Arbeitspakete wie bspw. das Härten fremdvergeben, steigt das Absatzvolumen von Lohnfertigern kontinuierlich [WIL07, RUS07]. Ist dies aber nicht der Fall und der Absatz bleibt konstant, so kann der Planer von den Betriebskennlinien Entscheidungshilfe für die Berechnung der neuen möglichen maximalen Ausbringung bekommen. Daraus kann er darüber hinaus Maßnahmen für die Festlegung der organisatorischen Parameter wie z. B. des Schichtmodells ableiten. Ist die neue deutlich schneller als die alte Technologie und die Auftragsstruktur bleibt unverändert, so ist es denkbar, dass die Produktion in weniger Schichten laufen kann.

Eine weitere Anwendung der Betriebskennlinien bei der Technologieänderung präsentiert Schneider in seiner Arbeit [SCH04, WIE02a]. In Erweiterung zu den Betriebskennlinien nach Nyhuis und Wiendahl [NYH03], die der Modellierung von einzelnen Arbeitssystemen dienen, entwickelte Schneider die sogenannten logistischen Fertigungsbereichskennlinien. Mit den Fertigungsbereichskennlinien wird das logistische Leistungsverhalten eines kompletten Fertigungsbereichs beschrieben. Eine Technologieänderung beeinflusst nicht nur das einzelne Arbeitssystem, sondern wirkt auch auf dessen Vernetzung mit den anderen Arbeitssystemen. Die aus dem Technologiewechsel resultierende Prozesskette kann mit Hilfe der Fertigungsbereichskennlinien beschrieben werden.

Für die Realisierung der Fertigungsbereichskennlinien bedarf es der Definition und Berechnung einer *Flussgröße* sowie der Abbildung der unterschiedlichen *Verknüpfungsarten* zwischen den einzelnen Arbeitssystemen im betrachteten Bereich. Im Falle einer Technologieänderung hängen diese beiden Parameter von der neuen Technologie ab.

Die *Flussgröße* ermöglicht die Verknüpfung von Arbeitsystemen über den Materialfluss [SCH04]. Hierfür definiert Schneider den Materialflusskoeffizienten MFK_i, der die Einbindung eines Arbeitssystems in den gesamten Materialfluss beschreibt (Gleichung (3)).

$$MFK_i = \frac{AnzAVG_i}{AnzAVG_{ges}} \tag{3}$$

mit:

MFK_i	Materialflusskoeffizient des Arbeitssystems i [-]
$AnzAVG_i$	Anzahl Arbeitsvorgänge, die im Untersuchungszeitraum am Arbeitssystem i zurückgemeldet wurden [-]

$AnzAVG_{,ges}$ Anzahl Arbeitsvorgänge, die im Untersuchungszeitraum insgesamt den Fertigungsbereich durchlaufen haben [-]

Erfolgt an einem Arbeitssystem eine Technologieänderung, so kann sich der entsprechende Materialflusskoeffizient ändern. Ist die neue Technologie z. B. schneller, so ist es durchaus möglich, dass das Arbeitssystem im gleichen Untersuchungszeitraum mehr Arbeitsvorgänge abarbeitet. In diesem Fall wird ein hoher Wert für MFK_i berechnet.

Schneider zitiert Breithaupt [BRE01] und unterscheidet zwischen fünf *Verknüpfungsarten*. Damit beschreibt er die Materialflussbeziehungen zwischen den Arbeitssystemen und ermöglicht die Abbildung von verzweigten Materialflüssen mit beliebig komplex vernetzten Arbeitssystemen in dem betrachteten Fertigungsbereich. Für seine Arbeit setzt er jedoch weiter auf die sogenannte n:n-Verknüpfung, weil sie alle denkbaren Materialflussbeziehungen zwischen den einzelnen Arbeitssystemen inkl. möglicher Rückflüsse der Arbeitssysteme auf sich selbst beschreiben kann. Diese Verknüpfungsart wird mit einer Materialflussmatrix abgebildet. Weil eine innovative Technologie in einer Strukturänderung der Prozesskette resultieren kann, wirkt sie dementsprechend auf die Materialflussmatrix. Dies kann der Fall sein, wenn die neue Technologie eine Eliminierung eines Arbeitsvorgangs ermöglicht (wie z. B. das Abgraten nach der Ablösung von Stanzen mit dem Laserschneiden) oder falls sie so schnell ist, dass zwei Arbeitssysteme durch ein System ersetzt werden.

Wenn die Fertigungsbereichskennlinien konstruiert sind, wird es in Analogie zu Abschnitt 3.3.1 möglich sein, die logistischen Potenziale und Grenzwerte einer neuen Technologie und vor allem der daraus resultierenden Prozesskette darzustellen und zu beschreiben.

3.3.3 Diskussion der Einsatzfelder und Anwendungen

Die logistischen Betriebskennlinien sind ein geeignetes Erklärungsmodell für die Darstellung der logistischen Potenziale sowie Grenzwerte einer neuen Technologie und bieten somit eine Entscheidungshilfe in einer frühen Phase des Technologielebenszyklus.

Darüber hinaus können aus den logistischen Betriebskennlinien Verbesserungsmaßnahmen abgeleitet werden, um die nach der Technologieänderung resultierenden Prozesse logistisch zu beherrschen. Löst die neue Technologie eine veraltete ab, so beeinflusst sie die Materialflüsse der bestehenden Produktion. Daraus entsteht eine neue Materialflussmatrix, und neue Betriebskennlinien können konstruiert werden. Sie zeigen den neuen Betriebspunkt und können für das Controlling verwendet werden.

Für die logistische Beherrschung der Produktionsprozesse infolge einer Technologieänderung ersetzen die Betriebskennlinien keine logistischen Methoden oder Aufgaben. Sie bieten jedoch eine weitere Hilfe für das Monitoring und Controlling an. In dieser Arbeit werden die Betriebskennlinien weiterhin zur Ermittlung von Zusammenhängen zwischen den technologischen und logistischen Parametern verwendet.

3.4 Wandlungsfähigkeit

Eine effiziente Technologieänderung bedarf der Fähigkeit des Produktionssystems zur aktiven, schnellen Anpassung der eigenen Strukturen (Anpassungsfähigkeit). Des Weiteren ist die Fähigkeit zur evolutionären Entwicklung dieser Produktionssysteme gefragt (Entwicklungsfähigkeit). Die Verbindung aus der Anpassungs- und Entwicklungsfähigkeit stellt den Kern der Wandlungsfähigkeit dar [HAR95].

3.4.1 Ansatz zur regelkreisbasierten Wandlungsfähigkeit

Die Wandlungsfähigkeit eines Unternehmens wird immer bedeutender für den Unternehmenserfolg. Wiendahl definiert sie als einen zentralen Ansatz zur Beherrschung der Umfeldturbulenzen [WIE02d, WIE05]. Nach Westkämpfer ist die Wandlungsfähigkeit der Produktionsstrukturen ein entscheidender Hebel für eine schnelle Reaktionsfähigkeit der unternehmensinternen Abläufe [WES06].

Durch einen Regelkreis wird die Wandlungsnotwendigkeit eines Unternehmens stets überwacht und falls erforderlich, Wandlungsprozesse eingeleitet, begleitet und kontrolliert. Bild 3-7 zeigt den Regelkreis der Wandlungsfähigkeit einer Fabrik nach einem Vorschlag von Nofen [NOF06, WIE05].

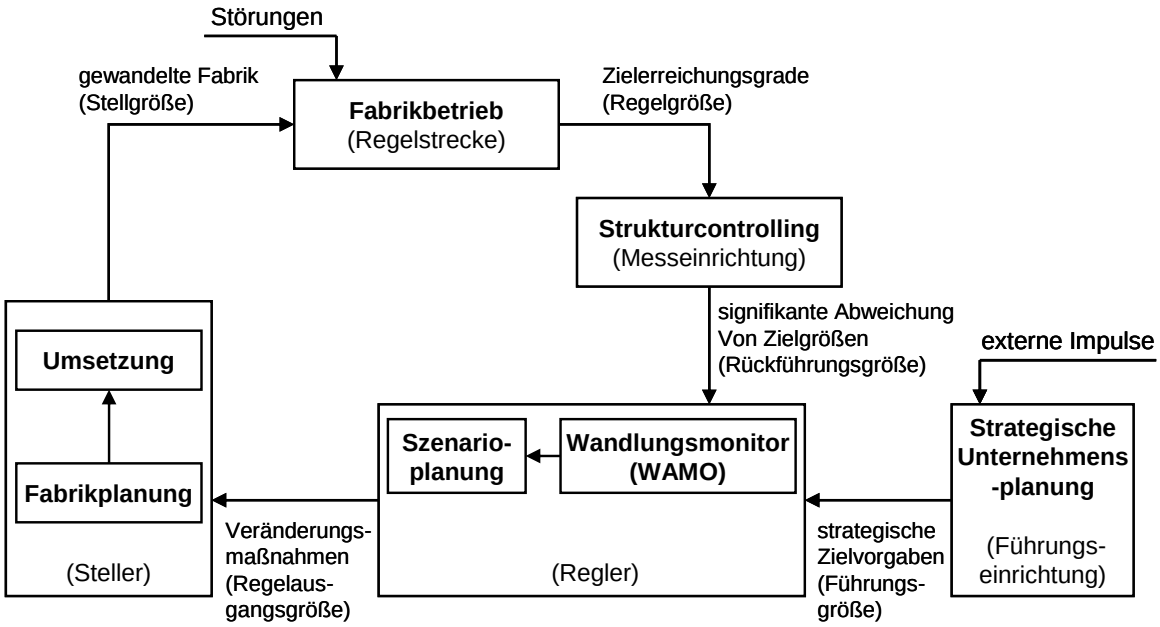


Bild 3-7: Regelkreis der Wandlungsfähigkeit einer Fabrik [WIE05]

Der Fabrikbetrieb stellt die zu regelnden Größen des dynamischen Systems (Regelstrecke) dar. Dabei werden alle Prozesse zum Auftragsmanagement erfasst, zu denen u. a. die Prozesse zur Produktionsplanung und -steuerung gehören. Die Regelgrößen, die entscheidend von externen sowie internen Störungen negativ beeinflusst werden können, sind hauptsächlich Zielerreichungsgrade im Hinblick auf Qualität, Logistik und Prozesssicherheit. Diese Informationen präsentieren die Eingangsdaten zum sogenannten Strukturcontrolling (Messeinrichtung).

Nach Dohms [DOH01] besteht die Aufgabe des Strukturcontrollings in erster Linie darin, die Eingangsdaten der Fabrik so aufzubereiten, dass diese vom Regler zur Überwachung des Wandlungsbedarfs eingesetzt werden können. Insbesondere werden Zielgrößenabweichungen ermittelt, die als Rückführgröße an den Regler weitergegeben werden.

Der sogenannte Wandlungsmonitor sowie die Szenarioplanung bilden den Regler, dessen Aufgaben hauptsächlich darin bestehen, den Wandlungsbedarf zu erkennen und zu konkretisieren, das Wandlungspotenzial zu bestimmen, mit dem Wandlungsbedarf zu vergleichen und somit abschließend notwendige Veränderungsmaßnahmen (Reglerausgangsgröße) abzuleiten. Der Steller beinhaltet die Fabrikplanung sowie die tatsächliche Umsetzung der Planungsergebnisse auf unterschiedlichen Ebenen.

Durch die dargestellte regelkreisbasierte Fabrikplanung werden Unternehmen, vorausgesetzt sie verfügen über ein Wandlungspotenzial, in die Lage versetzt, schnell und effizient auf dynamische Märkte zu reagieren und somit die Umfeldturbulenzen zu beherrschen.

3.4.2 Bedeutung der Wandlungsfähigkeit bei einer Technologieänderung

Die Methoden zur Wandlungsfähigkeit können für eine Technologieänderung sehr hilfreich sein. Sie stellen Anforderungen an alle Fabrikebenen von der Unternehmens- bis hin zur Maschinenebene, um schnell und effizient auf Marktänderungen zu reagieren. Eine solche Marktänderung kann auch die Einführung einer innovativen Technologie durch einen Wettbewerber sein. In diesem Fall stellt die neue Technologie die externen Impulse dar, die auf die strategische Unternehmensplanung wirkt (Bild 3-7).

Die bereits entwickelten Ansätze fokussieren sich aber ausschließlich auf die Fabrikstruktur. Zur Planung und Steuerung der Produktionsprozesse während des Wandels müssen weiterhin Methoden entwickelt werden [WES06].

3.5 Materialflusssimulation

Die Gestaltung der aus der Technologieänderung resultierenden Prozesskette bedarf einer hohen Anzahl an Experimenten. Weil dies in der Realität aus wirtschaftlichen Gründen kaum möglich ist bietet sich die Materialflusssimulation an.

3.5.1 Grundlagen der Materialflusssimulation

Ein geeignetes Unterstützungswerkzeug zur Bewältigung komplexer Planungs- und Steuerungsaufgaben der Logistik und somit zur Beherrschung unternehmensinterner sowie -übergreifender Prozesse ist die Materialflusssimulation. Vor allem durch Kopplung der Materialflusssimulation mit weiteren logistischen Analyse- und Bewertungsmethoden wird ein hoher Grad an Effizienz erreicht [FRA03]. Unter dem Begriff Simulation ist nach der VDI-Richtlinie 3633 [VDI97] ganz allgemein das Nachbilden technischer

Systeme mit den darin ablaufenden dynamischen Prozessen in einem experimentierfähigen Modell zu verstehen.

Unter dem Begriff „technisches System“ der hier betrachteten Fabrik werden zweckmäßig Logistik-, Materialfluss- und Produktionssysteme zusammengefasst [WIE04].

Simulationsmodelle eignen sich für zahlreiche Einsatzfelder und Funktionen und können unterschiedliche Abstraktionsebenen haben. Neben der simulativen Abbildung einzelner Arbeitssysteme ist die Modellierung von unternehmensinternen Prozessketten sowie -übergreifenden Lieferketten möglich [OUA05, WIE05b]. Des Weiteren wird die Materialflusssimulation auf den drei Anwendungsfeldern Planung, Realisierung und Betrieb eingesetzt [VDI97, KUH03]. Bild 3-8 stellt die unterschiedlichen Abstraktionsebenen sowie Einsatzfelder der Materialflusssimulation dar und zeigt selektiv mögliche Funktionen und Aufgaben.

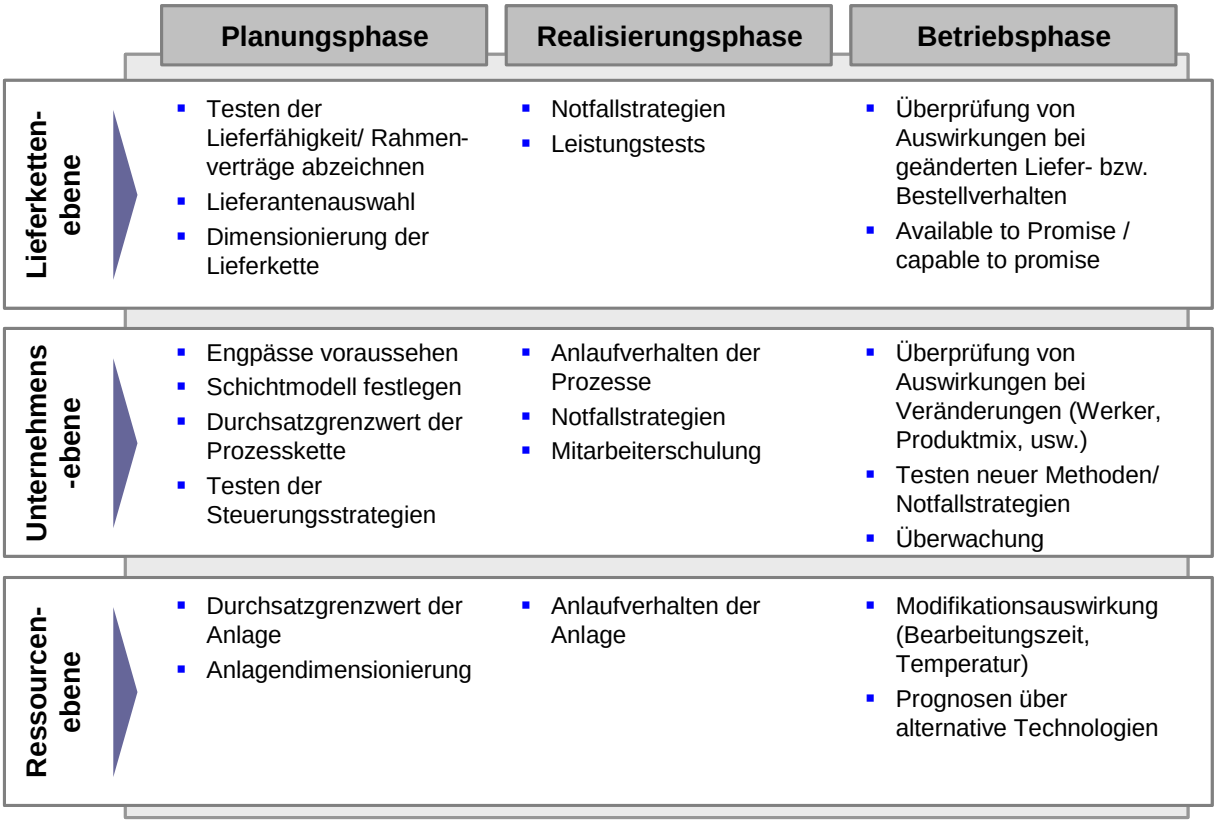


Bild 3-8: Einsatzfelder und Funktionen der Materialflusssimulation

Im Anwendungsfeld *Planungsphase* unterstützt das Simulationsmodell auf der Ressourcenebene die Ermittlung von Durchsatzgrenzwerten neuer Anlagen sowie deren Dimensionierung. Auf der Unternehmensebene können Engpässe vorausgesehen und Methoden zur Planung und Steuerung erprobt werden. Auf der Lieferkettenebene kann die Simulation bei der Lieferantenauswahl eingesetzt werden und so das Lieferverhalten unterschiedlicher Zulieferer modellieren. Außerdem kann die eigene Lieferfähigkeit abgeschätzt werden, bevor entsprechende Rahmenverträge mit den Kunden unterzeichnet werden. Des Weiteren hilft die Materialflusssimulation bei der Dimensionierung der Lieferkettenlogistik.

Während der *Realisierungsphase* ermöglicht die Simulation die Untersuchung des Anlaufverhaltens sowohl einzelner Arbeitssysteme als auch arbeitssystemübergreifender Produktionsprozesse. Ferner können Reaktionszeiten der inner- sowie der überbetrieblichen Prozesse ermittelt und Notfallstrategien erprobt werden. Darüber hinaus ist es möglich, Leistungstests einer ganzen Lieferkette bei einer schrittweisen Einsteuerung verschiedener Produktvarianten oder einer stufenweisen Kapazitätsausweitung im Sinne eines Probebetriebes zu simulieren.

Im Anwendungsfeld *Betriebsphase* erlaubt die Simulation die vergleichende Bewertung kurzfristiger und situationsabhängiger Ablaufvarianten, ohne in die Produktion eingreifen zu müssen. Auf der Ressourcenebene werden bspw. die Auswirkungen der Modifikation der technischen und logistischen Parameter der Anlagen auf die Logistikleistung der einzelnen Arbeitssysteme sowie auf das Gesamtsystem ermittelt. So werden z. B. mögliche Bestandsänderungen erkennbar, wenn die Bearbeitungszeit einzelner Prozesse verkürzt wird.

Ferner können mit Hilfe der Simulation die Auswirkungen geplanter neuer Technologien auf ein Produktionssystem untersucht werden. Auf der Unternehmensebene kann die Simulation als Hilfsmittel zur Parameteradaptation der Planungs- und Steuerungsbausteine dienen [FRA03]. Sie dient außerdem zur Überprüfung der Auswirkung von Veränderungen, beispielsweise der Produkte, des Auftragsmix oder der Arbeitszeitmodelle auf die erzielbare Logistikleistung. Auf der Lieferkettenebene wird die Simulation benutzt, um Auswirkungen von Änderungen des Zulieferer- oder Kundenverhaltens auf die eigene Lieferfähigkeit zu überprüfen. Sie unterstützt die Absatzplanung und beim Abschließen neuer Verträge.

Insgesamt steht mit der Materialflusssimulation ein Experimentierwerkzeug zur Verfügung, das sowohl der logistischen Prozesssicherheit dient als auch hervorragend geeignet ist, das Wissen der verantwortlichen Mitarbeiter zu entwickeln [FAS93].

Trotz des großen Potenzials auf allen Abstraktionsebenen sowie in den unterschiedlichen Einsatzfeldern wird die Simulation typischerweise meist nur in der Planungsphase eingesetzt [WIE00]. Ihre Nutzung zur Auslegung und zum Betrieb ganzer Lieferketten und Logistiknetzwerke birgt noch große Potenziale.

3.5.2 Materialflusssimulation zur Beherrschung neuer Technologien

Bei einer potenziellen Technologieänderung wird die Materialflusssimulation überwiegend für die Prozessgestaltung, aber auch für die Produktionsplanung und -steuerung verwendet, um mögliche Planungsvarianten frühzeitig vor ihrer Realisierung digital und kostengünstig überprüfen zu können. Dabei sind die Neuplanung der resultierenden sowie die Umplanung der bestehenden Produktionsprozesse betroffen.

Zu den Hauptaufgaben der Prozessgestaltung zählen die Umplanung der bestehenden Fertigung auf die neue Technologie, die exakte Auslegung der Pufferstrecken oder die Ermittlung der Anzahl der benötigten Werkstückträger für die innerbetriebliche Förderung der Erzeugnisse [STU03a, STU03b].

Darüber hinaus werden mit Hilfe der Materialflusssimulation die sich infolge einer Technologieänderung ergebenden dynamischen Prozesse abgebildet. Abhängig von der Aufgabenstellung können Werte für Takt-, Rüst- oder Störzeiten definiert und im Rahmen der Simulationsläufe schrittweise verändert werden [TÖN06, NYH05]. Aus den Simulationsergebnissen können anschließend logistische Anforderungen an die neue Technologie abgeleitet werden.

Im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung können des Weiteren potenzielle Engpässe nach einem Technologiewandel im ersten Schritt aufgezeigt und anschließend präventiv eliminiert werden [SCH06b]. Es können weiterhin Maßnahmen zum Erreichen der Soll-Stückzahlen validiert werden. Eine weitere wichtige Unterstützung der Materialflusssimulation besteht darin, die Grenzwerte der aus der neuen Technologie resultierenden Produktionssysteme aufzuzeigen sowie deren Kapazitäten und Belegung zu planen.

3.5.3 Diskussion der Einsatzfelder und Anwendungen

Um die Akzeptanzprobleme bezüglich des Einsatzes der Materialflusssimulation zu analysieren, wurde im Jahr 1993 eine Umfrage unter Planungsfachleuten und Simulationsanwendern durchgeführt [BOC93]. Bei der Befragung wurden 124 Antworten ausgewertet. 43 % der Antworten kamen aus den Hochschulen, 38 % aus der Industrie und 19 % von Dienstleistern. Die Ergebnisse zeigten, dass das größte Problem für die Akzeptanz der Simulationstechnik deren fehlende Integration in die betrieblichen Abläufe ist. Die weiteren genannten Hauptgründe für die Akzeptanzprobleme waren der hohe Datenbeschaffungsaufwand für die Simulationsmodelle, die Mächtigkeit der Simulationswerkzeuge sowie der mangelnde Bedienungskomfort.

Eine weitere Studie aus dem Jahr 1997 bestätigte die erste Umfrage [REI97]. Im Rahmen der Studie wurden 3.500 Führungskräfte und Anwender aus den Bereichen Entwicklung, Produktion und Logistik deutscher Unternehmen befragt. Bei der Studie wurden die Befragten u. a. nach ihren Wünschen hinsichtlich einer Verbesserung der Simulationswerkzeuge befragt. Am häufigsten wurden die Verbesserung der Bedienbarkeit, Vereinfachung der Datenbeschaffung über vordefinierte Schnittstellen, Reduzierung des Modellierungs- und Validierungsaufwands sowie Senkung der Systempreise genannt. Obwohl die Materialflusssimulation weit verbreitet und weit entwickelt worden ist, erfüllt sie immer noch nicht alle Anforderungen der Anwender. Bedingt durch steigende Komplexität der Unternehmens- und Lieferkettenstrukturen sowie durch zunehmende Marktdynamik ist die Simulationstechnik einem steten Anforderungswandel unterworfen. Heutige Simulationssysteme sind meistens sehr komplex in ihrer Funktionalität und somit schwer bzw. nur von geschulten Anwendern anwendbar. Ihre Nutzung erfordert umfangreiches logistisches und simulationstechnisches Expertenwissen. Die bereits existierenden Lösungen sind sehr kosten- und zeitintensiv. Simulationssysteme, die durch ihre Standardfunktionalitäten Möglichkeiten bieten, Marktdynamik zu berücksichtigen, und somit eine Hilfestellung bei der Produktionsplanung und -steuerung bieten, sind nach wie vor eine Rarität.

Die Materialflusssimulation bietet eine unerlässliche Hilfe für die Simulation der Auswirkungen der Technologieänderung auf die bereits bestehenden Produktionsprozesse

an. Außerdem können mit deren Hilfe verschiedenste logistische sowie technische Verbesserungsmaßnahmen erprobt und validiert werden. Dennoch fehlt in der Literatur ein Simulationsmodell, welches sämtliche Aspekte der Technologieänderung ganzheitlich betrachtet. Um die aus einer Technologieänderung resultierenden Fertigungsprozesse sowie die davon abhängenden logistischen Prozesse simulativ zu beherrschen, sollen Simulationssysteme idealerweise die folgenden Eigenschaften besitzen:

Schnelligkeit: Die Simulationsläufe sollen schnell durchführbar sein. Dazu muss die Simulationsumgebung aufwandsarm implementierbar sein. Die Algorithmen sollen einfach programmierbar sein und bei der Simulation möglichst wenig Rechenleistung erfordern.

Bedienbarkeit: Der Benutzer des Simulationssystems soll ein Lieferkettenmodell ohne tief greifendes Simulations-Know-how generieren können. Dialogfenster sollen die Simulation erleichtern.

Ganzheitlichkeit: Die aufeinander abgestimmte Betrachtung der drei genannten Abstraktionsebenen – von den innerbetrieblichen Prozessen und Ressourcen bis hin zur Lieferkette – soll möglich sein. Des Weiteren soll das Simulationsmodell alternative Produktionsplanungs- und -steuerungsmethoden abbilden können. Dies kann entweder durch eine Schnittstelle zu einem externen PPS-System oder durch die direkte Implementierung der Methoden in das Simulationsmodell mit einer simulationseigenen Programmiersprache erfolgen.

Skalierbarkeit: Der Simulationsanwender soll den Genauigkeitsgrad der Simulation, abhängig von der Aufgabenstellung, definieren können. Um zum Beispiel die Grenzkapazitäten einer Anlage zu ermitteln, soll es möglich sein, alle externen Störungen zu vernachlässigen. Um im Gegensatz dazu den „Worst Case“ zu planen, muss es möglich sein, die vom Kunden bzw. Zulieferer induzierten Turbulenzen zu verstärken. Daher sollen alle Objekte des Simulationsmodells skalierbar sein.

Erweiterbarkeit: Um unterschiedliche Szenarien modellieren zu können (Fertigungsabläufe, Lieferketten usw.), soll das Einbinden neuer Objekte (z. B. eines neuen Zulieferers) in bestehende Lieferketten oder Prozesse einfach möglich sein. Ferner sollen die PPS-Methoden einfach um weitere Verfahren oder Funktionalitäten erweiterbar sein.

Wandlungsfähigkeit: Das Simulationsmodell soll mit wenig Aufwand verändert werden können. Die Umstrukturierung von unternehmensinternen Materialflüssen oder die Neugestaltung von Lieferketten, zum Beispiel durch das Einbinden neuer Lieferkettenglieder, soll schnell und einfach durchführbar sein. Des Weiteren soll es möglich sein, die Produktionsplanungs- und -steuerungsmethoden durch alternative Methoden auszutauschen. Deshalb soll das Simulationsmodell bausteinbasiert aufgebaut werden.

Übertragbarkeit: Das Simulationsmodell soll so generiert werden, dass es nicht nur für einen speziellen Fall anwendbar ist. Es soll so allgemeingültig sein, dass verschiedene Fertigungsprinzipien mit dem gleichen Modell simuliert werden können.

Um die heutigen Simulationsmodelle qualitativ zu bewerten, wird das nachstehende Polaritätsdiagramm verwendet. Das Polaritätsdiagramm ist ein n-achsiges Koordinatensystem, mit dessen Hilfe eine Funktion in Bezug auf verschiedene Kriterien bewertet

wird. Zur Bewertung der Materialflusssimulation wird ein Polaritätsdiagramm mit sieben Bewertungsachsen eingesetzt, welche die oben beschriebenen Anforderungen widerspiegeln (s. Bild 3-9). Jede Achse beinhaltet drei Bewertungsstufen, wobei die Höchstbewertung in der Achsenrichtung einer vollen Erfüllung der Anforderung entspricht.

Basierend auf zahlreichen Literaturquellen, die unterschiedliche Simulationslösungen darstellen [MER98, EHR01, BAI02, SCH02, WIE04, INA05, BLU06, WOR06], kann die in Bild 3-9 dargestellte Einschätzung abgeleitet werden.

Dank der raschen Entwicklung der Rechner- und Betriebssystemplattformen auf der einen Seite und der objektorientierten Programmierung auf der anderen Seite ist es gelungen, die Simulationsgeschwindigkeit wesentlich zu erhöhen. Des Weiteren ist die Bedienbarkeit der Simulationswerkzeuge deutlich verbessert worden durch die Verbreitung grafischer Benutzeroberflächen. Dennoch existieren weiterhin große Mängel und Defizite.

Simulationsanwendungen sind nach wie vor Einzwecklösungen und selten für eine vielfache Wiederverwendung konzipiert. Sie sind i. d. R. nicht wandlungsfähig und somit nur bedingt übertragbar und decken somit nicht alle möglichen Einsatzfelder ab. Durch die objektorientierte Programmierung wird es ermöglicht, die Simulationsmodelle beliebig zu skalieren und zu erweitern. Dennoch bleibt bezüglich dieser zwei Anforderungen weiteres ungenutztes Potenzial.

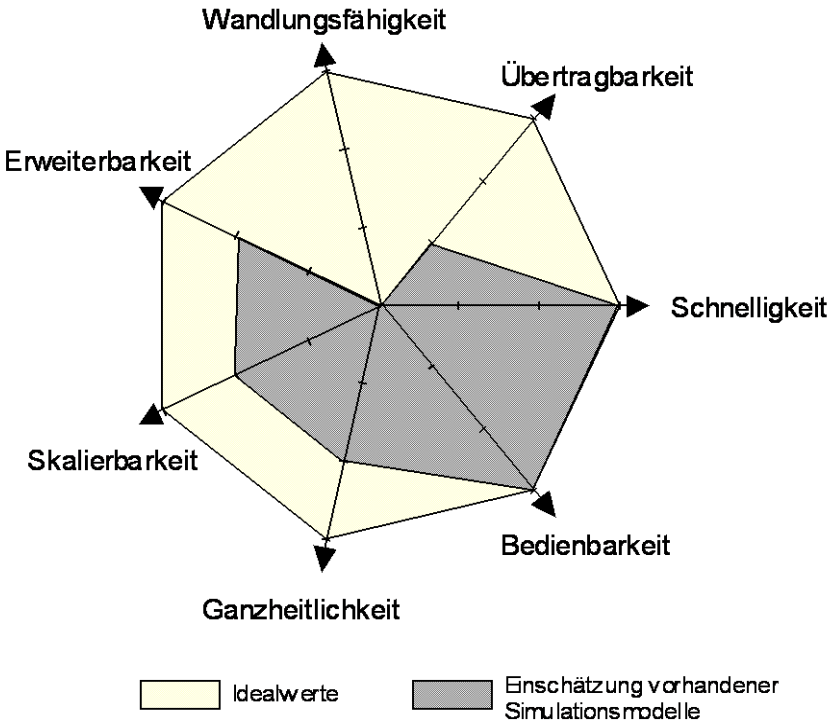


Bild 3-9: Einschätzung der vorhandenen Simulationsmodelle

Im Rahmen dieser Arbeit wird daher ein generisches Simulationsmodell entwickelt, welches allen oben aufgelisteten Anforderungen gerecht wird. Dabei wird vor allem auf die Aspekte der Wandlungsfähigkeit und der schnellen Anpassbarkeit geachtet, die bei

der Technologieänderung wegen des hohen Validierungsaufwandes unumgänglich sind.

3.6 Ansätze zur simultanen Betrachtung von Logistik und Technologie

3.6.1 Ansatz des Simultaneous Engineering

Das *Simultaneous Engineering*, was übersetzt „gleichzeitige Entwicklung“ bedeutet, stellt eine Vorgehensweise in der technischen Entwicklung von Produkten dar, die auf die Verkürzung der Entwicklungszeit, Vermeidung von späteren Produktänderungen sowie Verbesserung der Abstimmung zwischen Entwicklung und Produktion abzielt.

Kernidee dabei ist die zeitliche Überlappung von Entwicklungsschritten, die in einem traditionellen Projektablauf sequenziell durchgeführt werden [RAM97]. Es wird dabei mit einem Entwicklungsschritt parallel begonnen, wenn in dem vorherigen Schritt ausreichend Informationen erarbeitet wurden.

Dies kann in manchen Fällen zu Mehrarbeit führen, weil ein Entwicklungsschritt nicht mit dem endgültigen Informationsstand aus dem vorherigen Abschnitt gestartet wird und sich die Arbeitsgrundlage noch verändern kann. Der Hauptvorteil dagegen liegt darin, dass potenzielle Entwicklungsfehler schneller erkannt und rechtzeitig beseitigt werden können. Dadurch können Folgekosten reduziert werden.

Bild 3-10 stellt die einzelnen Schritte der Produktentwicklung bei einem traditionellen Projektablauf sowie bei der Nutzung des Simultaneous Engineering dar und zeigt den potenziellen Zeitgewinn.

Das Simultaneous Engineering ist besonders bedeutend in der Zeitspanne zwischen den Schritten *Produktentwicklung/Versuche* und *Produktionsplanung/Betriebsmittelkonstruktion* [RAM97].

Beim traditionellen Entwicklungsablauf werden diese Schritte streng voneinander getrennt durchgeführt. Erst nach einer abgeschlossenen Produktkonstruktion beginnt die Planung der Produktionsanlagen zur Produktherstellung.

Das Simultaneous Engineering dagegen sieht vor, dass die Produktionsplanung bereits nach der Ausarbeitung der vorläufigen Produktversionen beginnt. Die restlichen Entwicklungsschritte laufen anschließend parallel zur Betriebsmittelplanung. Entscheidend für eine erfolgreiche simultane Entwicklung ist der ständige Informationsaustausch zwischen den betroffenen Abteilungen. Konstruktionsänderungen müssen in die Betriebsmittelplanung einfließen, und mögliche Probleme oder Optimierungsmöglichkeiten bei der Produktionsplanung können in einer Änderung der Konstruktion resultieren. Dadurch, dass die Betriebsmittel teilweise schon nach dem Abschluss der Produktentwicklung geplant werden, ergibt sich eine Zeitersparnis. Durch den Informationsrückfluss, der in Form von Korrekturschleifen erfolgt, ergeben sich weitere wichtige Vorteile, wie das frühzeitige Aufdecken von konstruktionsbedingten Produktionsproblemen.

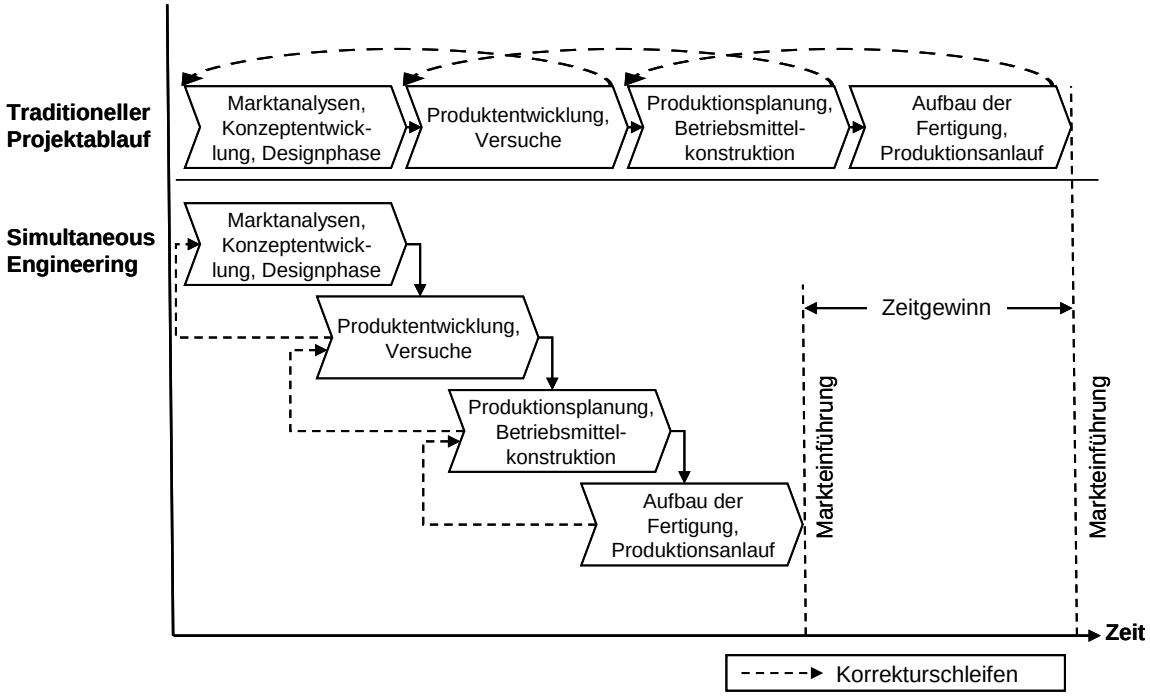


Bild 3-10: Zeiteinsparungspotenzial mit dem Simultaneous Engineering

Die Ablösung einer alten durch eine innovativere Technologie wird fast immer als ein neues Projekt betrachtet. Für eine schnelle Technologieänderung bieten sich daher die Methoden des Simultaneous Engineering an. Neben der Verkürzung der Projektzeit werden die Zusammenhänge zwischen den Produktcharakteristika und den technischen Parametern der neuen Technologie stets berücksichtigt [RAM97]. Hauptziel dabei ist das Erreichen einer verbesserten Bauteilqualität nach dem Technologiewechsel. Die Betrachtung der logistischen Auslegung, Planung und Steuerung der aus der neuen Technologie resultierenden Arbeitssysteme wird jedoch bei diesem Ansatz nicht ausreichend berücksichtigt.

3.6.2 Simultane Betrachtung der Wechselwirkungen technischer und logistischer Produktionsprozesse

Der Anstieg der Komplexität von Produktionssystemen, verursacht z. B. durch Dynamisierung der Produktionssystemstrukturen, Marktglobalisierung, steigende Marktdynamik oder zunehmende Variantenvielfalt der Erzeugnisse, erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der entscheidenden Kaufkriterien von Produkten [WAR94].

Penz definiert *Produktqualität* und *Logistikleistung* als entscheidende Kaufkriterien und betont die zwingende Notwendigkeit der simultanen Anstrengungen zur Leistungssteigerung dieser beiden Faktoren, um den Kundennutzen und die Differenzierung vom Wettbewerb zu steigern [PEN96].

In seiner Arbeit ermittelt er zunächst die Wechselwirkungen zwischen der technischen und logistischen Qualität. Er erweitert die Modellierungs- und Visualisierungsmethoden zum Monitoring der Logistikleistung um die Interdependenzen der logistischen Zielgrößen mit der technischen Qualität. Dabei betrachtet er hauptsächlich den Einfluss der

technischen Qualitätsmängel auf die Auftragszeitstruktur. Weil die Qualitätsmängel wegen des produzierten Ausschusses in einer Überproduktion sowie in einem erhöhten Aufwand zur Nacharbeit resultieren, verlängert sich die mittlere Auftragszeit. Penz leitet, basierend auf analytischen Untersuchungen und simulativer Validierung, die folgenden Gleichungen (4) und (5) ab, die den Zusammenhang zwischen der Nacharbeit bzw. produzierten Ausschussmenge und der mittleren Auftragszeit funktional darstellen.

$$ZAU_m(E) = ZAU_m(S) + NPSA * ZNA_m \quad (4)$$

mit:

$ZAU_m(E)$	mittlere erwarte Auftragszeit unter Betrachtung der Einflüsse der Nacharbeit [Std]
$ZAU_m(S)$	Soll mittlere Auftragszeit [Std]
$NPSA$	Nacharbeitsprozentsatz bezogen auf die Anzahl der Arbeitsvorgänge [%]
ZNA_m	mittlere Nacharbeitszeit [Std]

Oder:

$$ZAU_m(E) = \frac{1}{1 + APSA} * (ZAU_m(S) + APSA * ZEA_m) \quad (5)$$

mit:

$ZAU_m(E)$	mittlere erwarte Auftragszeit unter Betrachtung der Einflüsse des Ausschusses [Std]
$ZAU_m(S)$	Soll mittlere Auftragszeit [Std]
$APSA$	arbeitsvorganganzahlbezogener Ausschussprozentsatz [%]
ZEA_m	mittlere Ersatzauftragszeit [Std]

In einem zweiten Schritt seiner Arbeit verknüpft Penz die Bereiche und Funktionen des Qualitätsmanagements und der Logistik zu einem simultanen Qualitätsmanagement. Aus diesem Ansatz resultierte das in Bild 3-11 dargestellte Regelkreismodell.

Kernidee seines Ansatzes ist, den bereits in der Praxis verbreiteten Regelkreis des technischen Qualitätsmanagements (unterer Teil in Bild 3-11) auf die Logistik zu übertragen. Der resultierende Regelkreis zum logistischen Qualitätsmanagement (oberer Teil in Bild 3-11) wird anschließend simultan mit dem technischen Regelkreis gesteuert. Beide Regelkreise bestehen aus den drei Kernelementen *Planung*, *Lenkung* und *Prüfung*. Während der Planung werden die Qualitätsmerkmale sowie deren zulässige Toleranzen definiert. Diese Merkmale sind je nach Regelkreis entweder technischer oder logistischer Art. Bei der Lenkung geht es anschließend um die Überwachung und Korrektur der Beschaffungs-, Produktions- sowie Absatzprozesse zum Zwecke der Einhaltung der im Vorfeld definierten Qualitätsmerkmale. Erste Ergebnisse der Lenkung sind aufbereitete Prüfdaten sowie berechnete Kennzahlen. Die Prüfung erfolgt in Form eines Soll-Ist-Vergleichs und leitet daraus, basierend auf den Rückmeldedaten, den Erfüllungsgrad der vordefinierten technischen bzw. logistischen Forderungen ab. Die Prü-

fungsergebnisse werden abschließend an die Lenkung zum Zwecke einer weiteren Analyse und Bewertung zurückgeführt.

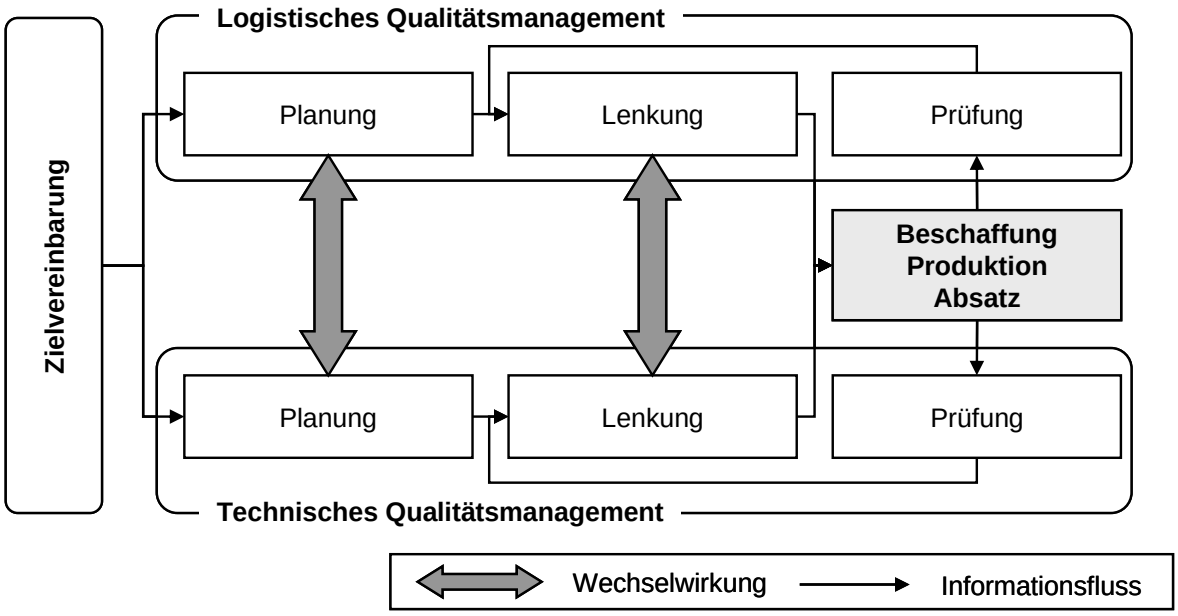


Bild 3-11: Regelkreismodell zum simultanen Qualitätsmanagement [nach Penz]

Die Betrachtungen von Penz zeigen keinen direkten Zusammenhang zu einer Technologieänderung. Dennoch sind sie für die Durchführung der vorliegenden Arbeit sehr hilfreich. Der Autor betrachtet ausschließlich die Qualitätsmängel als technische Merkmale. Diese unterscheiden sich von einer Technologie zur anderen und müssen daher bei einer logistischen Betrachtung der Technologieänderung berücksichtigt werden.

Eine Technologie hat aber weitere technische Parameter, die die logistische Zielerreichung beeinflussen können. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit in Kapitel 5 ermittelt.

Ferner betont Penz die Wichtigkeit eines simultanen Qualitätsmanagements, ohne dabei eine methodische Vorgehensweise zur Adaptation der Planparameter zu zeigen. Die Entwicklung einer solchen Methode bildet den Kern dieser Arbeit und wird ebenfalls in Kapitel 6 dargestellt.

4. Aufgabenstellung

4.1 Ableitung des Handlungsbedarfs

Um die Abläufe der systematischen betriebswirtschaftlichen Planung, Organisation, Durchführung und Kontrolle aller mit dem Technologiemanagement gebundenen Unternehmensaktivitäten zu standardisieren, werden Prozessmodelle eingesetzt. Diese Prozessmodelle definieren die während der unterschiedlichen Phasen des Technologielebenszyklus durchzuführenden Tätigkeiten. Dabei wird fast ausschließlich auf die technische und wirtschaftliche Realisierung der neuen Technologie fokussiert.

Die einzelnen Schritte des Technologiemanagements sowie die zu deren Ausführung notwendigen Instrumente und Methoden sind sehr betriebswirtschaftsorientiert und vernachlässigen die Zusammenhänge zwischen der neuen Technologie und den logistischen Aspekten. Die Auswirkungen der technologischen Innovation auf die logistische Gestaltung der überbetrieblichen Liefer- und der innerbetrieblichen Prozesskette sowie auf die Methoden zur Produktionsplanung und -steuerung werden dabei nicht berücksichtigt. Die gängigen Prozessmodelle, welche die Literatur prägen, betrachten darüber hinaus nicht, welche Anforderungen eine neue Technologie aus logistischer Sicht zu erfüllen hat.

Dadurch können die mit der neuen Technologie verbundenen logistischen Potenziale nicht ausreichend ausgeschöpft werden und daher bedarf es eines methodischen Vorgehens zur logistischen Beherrschung der neuen Technologie.

Die logistische Beherrschung von Technologien bzw. Arbeitssystemen ist ein breites Forschungsthema. Hierfür wurden in der einschlägigen Literatur zahlreiche Ansätze beschrieben, die sich allerdings fast in allen Fällen auf Arbeitssysteme bzw. Technologien fokussieren, die sich bereits in der Reifephase befinden. Die Dynamik und Komplexität der Technologien während der frühen Lebenszyklusphasen (Technologieentstehung und -wachstum) wird somit nur bedingt abgedeckt. Es mangelt an adaptiven logistischen Methoden, welche die Produktion abhängig von dieser Komplexität und Dynamik planen und steuern, um die Technologie zu beherrschen und die damit gebundenen logistischen Potenziale auszuschöpfen.

Zahlreiche Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass die Materialflusssimulation ein geeignetes Werkzeug für die Abbildung der Technologiekomplexität und -dynamik darstellt [FRA03]. Mit Hilfe der Materialflusssimulation kann die Technologie und deren Umfeld auf den unterschiedlichsten Abstraktionsebenen modelliert werden. Weil während der Entstehungs- und Wachstumsphase die Technologie sehr dynamisch ist, was durchaus die gesamten inner- sowie überbetrieblichen logistischen Abläufe beeinflusst und deren Umstrukturierung erfordert, müssen die Simulationsmodelle schnell und einfach anpassbar sein. Hier treffen die in der Literatur einschlägigen Modelle auf ihre Grenzen.

Ein für die logistische Beherrschung neuer Technologien unterstützendes Simulationswerkzeug soll mit wenig Aufwand verändert werden können. Die Umstrukturierung von unternehmensinternen Materialflüssen oder die Neugestaltung von Lieferketten, zum

Beispiel durch das Einbinden neuer Lieferkettenglieder, soll schnell und einfach durchführbar sein.

4.2 Zielsetzung der vorliegenden Arbeit

Die vorliegende Arbeit hat daher zum Ziel, ein methodisches Vorgehen zum Zwecke der logistischen Beherrschung einer neuen Technologie zu entwickeln. Hierfür sollen die Zusammenhänge zwischen einer neuen Technologie und den logistischen Aspekten identifiziert werden. Es wird hierbei hauptsächlich die Entstehungs- und Wachstumsphase der technologischen Innovation betrachtet. Es ist des Weiteren zu betonen, dass es im Rahmen dieser Arbeit um neue Technologien geht, die konventionelle Verfahren ablösen und für die Fertigung der gleichen Produkte eingesetzt werden.

Abgeleitet aus den identifizierten Zusammenhängen sollen logistische Aufgaben definiert werden, die im Laufe des Technologielebenszyklus durchzuführen sind. Für die Durchführung der relevanten Aufgaben, die hauptsächlich während der frühen Phasen des Technologielebenszyklus durchzuführen sind, werden adäquate Methoden entwickelt.

Darüber hinaus soll ein simulationsbasiertes Werkzeug entwickelt werden, welches der Erprobung verschiedener Szenarien zur Liefer- und Prozesskettengestaltung in der Technologieentstehungsphase dient. Das Werkzeug soll bausteinbasiert aufgebaut werden und einfach und schnell veränderbar sein.

Es wird des Weiteren darauf abgezielt, eine adaptive Methode zu entwickeln, welche zur Planung und Steuerung der Produktion während der Wachstumsphase einer Technologie eingesetzt wird. Diese Methode soll dazu dienen, die Planparameter bei der Messung einer Logistikzielabweichung im PPS-System anzupassen. Entsprechend der logistischen Parametereinstellung sollen Anforderungen an die Technologie abgeleitet werden.

4.3 Vorgehensweise

Um dieses Ziel zu erreichen, werden zuerst die Zusammenhänge zwischen den technologischen und logistischen Planparametern ermittelt. Dann werden die Wechselwirkungen zwischen einer neuen Technologie und den Parametern zur Gestaltung von Prozessketten erforscht. Hierfür werden mögliche Auswirkungen einer technologischen Innovation auf die Liefer- und Prozesskette sowie auf die Methoden zur Produktionsplanung und -steuerung ermittelt. Es werden darüber hinaus die logistischen Anforderungen aus Sicht der Logistik an die neue Technologie definiert.

Anschließend wird der Lebenszyklus von Technologien aus logistischer Sicht untersucht. Es sind dabei die logistischen Merkmale zu identifizieren, die eine Technologie in den verschiedenen Lebenszyklusphasen charakterisieren. Daraus werden in einem späteren Schritt logistische Aufgaben abgeleitet, die für die logistische Beherrschung der neuen Technologie relevant sind.

Im darauf folgenden Schritt werden Anforderungen ermittelt, die von den zur Durchführung dieser Aufgaben erforderlichen Methoden und Instrumenten zu erfüllen sind. Vor allem wegen der hohen Dynamik und Komplexität einer Technologie während der Entstehungs- und Wachstumsphase müssen solche Methoden adaptiv gestaltet werden sowie schnell und einfach anpassbar sein.

Diese Methoden werden abschließend entwickelt und am Beispiel des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung auf ihre Wirksamkeit erprobt. Für die Technologieentstehungsphase wird ein simulationsbasiertes Werkzeug aufgebaut, welches die Integration der neuen Technologie in den bestehenden Fertigungsablauf unterstützt. Es soll der Erprobung der durch die neuen Technologien ermöglichten Ausgestaltungen der Liefer- und Prozesskette dienen.

Für die Technologiewachstumsphase, die durch eine unreife Technologie und durch das kontinuierlich steigende Volumen der Produktionsaufträge gekennzeichnet ist, wird eine Methode zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung entwickelt, deren Planparameter in Abhängigkeit von den veränderlichen Randbedingungen kontinuierlich angepasst werden können.

5. Ermittlung der Zusammenhänge zwischen Technologie und Logistik

Die Ablösung einer veralteten durch eine innovativere Technologie fordert in der Regel eine logistische Umgestaltung der Produktionsprozesse. Hierfür werden Soll- sowie Toleranzwerte festgelegt, die stets überwacht und angepasst werden müssen. Vor allem die Festlegung dieser Werte bedarf der Kenntnisse über die Abhängigkeiten der logistischen Parameter und Ziele von den technologischen Merkmalen der neuen Technologie.

In diesem Kapitel werden zuerst die relevanten technologischen Parameter dargestellt und ihre möglichen Einflüsse auf die Parameter zur Produktionsplanung und -steuerung (5.1) sowie zur Gestaltung der Produktionsprozesse (5.2) identifiziert.

Basierend auf den in Kapitel 3 präsentierten Modellen zum Technologiemanagement sowie zur Abbildung des Technologielebenszyklus werden weiterhin relevante logistische Aufgaben ermittelt, die zur logistischen Beherrschung der Produktionsprozesse bei einer Technologieänderung beitragen (5.2).

Für die Durchführung dieser Aufgaben werden abschließend Methoden entwickelt (Kap.6) und beschrieben.

5.1 Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den PPS- und den technologischen Parametern

Die für die Logistik bedeutenden technologischen Parameter sind diejenigen, die eine direkte Auswirkung auf die Zeitgrößen des Prozesses, den Bestand oder die Leistung eines Produktionssystems haben. In Bild 5-1 sind neben den Kategorien der logistischen Parameter die aus logistischer Sicht relevanten technologischen Parameter dargestellt.

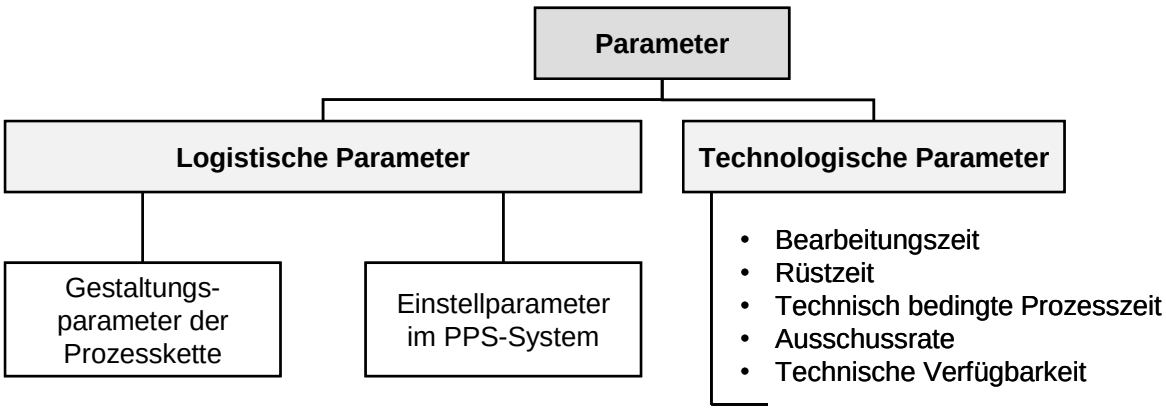


Bild 5-1: Relevante technologische und logistische Parameter

Die technologischen Parameter, die die Zeitgrößen beeinflussen, sind die *Bearbeitungszeit*, *Rüstzeit* sowie *technisch bedingte Prozesszeit*, wie z. B. die benötigte Zeit zum Trocknen nach dem Lackieren. Letztere hat ebenso einen Effekt auf den Umlaufbestand. Der von der Technologie bzw. von dem ausführenden Produktionssystem ver-

ursachte *Ausschuss* verlängert die Auftragszeit und wirkt sich sowohl auf die Zeitkomponente als auch die Leistung des Produktionssystems aus. Ein weiteres technologisches Merkmal, welches die Leistung beeinflusst, ist die *technische Verfügbarkeit des Produktionssystems*. Diese Zusammenhänge werden in den Abschnitten 5.1.1 und 5.1.2 detaillierter beschrieben.

Die logistischen Parameter werden in die zwei Kategorien Gestaltungs- und PPS-Parameter untergliedert. Bei den Gestaltungsparametern handelt es sich um die Kenngrößen, die der Strukturierung sowie Dimensionierung der Prozesskette dienen. Diese sind hauptsächlich die Anzahl der redundanten Anlagen, der Verkettungsgrad zwischen zwei Prozesselementen und die Größe des Zwischenpuffers zwischen zwei Arbeitssystemen (vgl. 5.3.3).

Logistische Planungs- und Steuerungsparameter (*Einstellparameter im PPS-System*) beeinflussen die Ziele des Anwenders und wirken auf das Verhalten des zu planenden logistischen Ablaufs. Diese Parameter eröffnen dem Anwender, im Sinne alternativer Einstellwerte, einen Entscheidungsspielraum und bieten ihm somit eine planerische Bewegungsfreiheit [HOP05].

Die folgende Tabelle 5-1 fasst die relevanten Parametermerkmale und deren mögliche Ausprägungen zusammen. Die Matrixfelder in Hellgrau zeigen dabei die Ausprägungen der PPS-Parameter, wobei die weiß hinterlegten restlichen Felder weitere Ausprägungsmöglichkeiten für restliche PPS-Daten auflisten.

Tabelle 5-1: Allgemeine Merkmale von PPS-Parametern [DIT03]

Merkmal	Merkmalsausprägung				
Struktur	Datenfeld	Datensatz	Tabelle/ Datei	Datenbank	
Funktion	planend	dispositiv	administrativ		
Aufgabe	steuernd	berechnend	auswählend	identifizierend	qualifizierend
Stellung	Eingabe	Referenz	Ausgabe		
Darstellung	numerisch (metrisch)	alphabetisch (nominal)	alphanumerisch (nominal)		
Aufbau	formatiert	unformatiert			

Eine Parametereinstellung wird immer in einem entsprechenden Tabellenfeld der Stammdaten gespeichert. Ein Parameter hat deshalb immer die Strukturausprägung *Datenfeld*. Mit dem Merkmal *Funktion* wird die Aufgabe eines Datums im Laufe der Planungs- und Steuerungsprozess dargestellt. Die PPS-Parameter wirken lang- bis mittelfristig auf die Planungsergebnisse und erfüllen somit in erster Linie eine planende oder dispositive *Funktion*, deshalb werden sie oft auch Planungsparameter genannt [MER05]. Das Beschreibungsmerkmal *Aufgabe* definiert die Art der Funktionserfüllung einer Einstellgröße. Ein Planungsparameter ist entweder steuernd, berechnend oder

auswählend. Steuernde Parameter legen eine Methode oder ein Verfahren zur Durchführung einer entsprechenden Funktion fest. Ein derartiger Parameter ist z. B. die Selektion der Bestellpolitik. Damit wird entschieden, in welchen Mengen und welchem Rhythmus die Bedarfe bestellt werden sollen. Die Beschaffungsprozesse werden in diesem Fall abhängig von diesem Parameter gesteuert. Ein Parameter wirkt dagegen berechnend, wenn er direkt als Variable in einer Berechnungsformel berücksichtigt wird. Wird z. B. die Fertigungslosgröße berechnet, so kann der zu produzierende Bedarf ein berechnender Parameter sein.

Auswählende Parameter selektieren mögliche Eingangsdaten einer Funktion. Läuft z. B. die Fertigung in unterschiedlichen Schichtmodellen, so ist die Zuordnung eines Schichtmodells zu einem Fertigungsbereich ein auswählender Parameter. PPS-Parameter können entweder numerisch, alphabetisch oder alphanumerisch (Merkmal *Darstellung*) eingegeben werden (Merkmal *Stellung*). Sie müssen einem fest bestimmten Wertebereich angehören und sind somit formatiert (Merkmal *Aufbau*).

Um die Anzahl der PPS-Parameter auf einen überschaubaren Rahmen einzuschränken, werden in dieser Arbeit in erster Linie die planungs- und dispositionsrelevanten Parameter betrachtet. Diese relevanten Parameter werden aus der Analyse des bereits zum Referenzmodell gewordenen Aachener PPS-Modells [SCH06a] abgeleitet. Das am Aachener Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) entwickelte PPS-Modell gilt als ein wichtiges Modell für die Praxis und ist bewährt als Grundlage für betriebliche Gestaltungsmaßnahmen. Wesentliche Aufgaben des Aachener PPS-Modells sind zum einen die Beschreibung der Aufgaben und Funktionen der PPS und zum anderen die Unterstützung bei der Ermittlung der Zielgrößen, die der Auslegung eines Systems oder Konzepts dienen [SCH06a]. Tabelle 5-2 listet in Anlehnung an das Aachener PPS-Modell die Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung sowie deren Funktionen auf. Die dritte Spalte der gleichen Tabelle präsentiert die relevanten PPS-Parameter.

Eine ausführliche Untersuchung der einschlägigen Literatur zu den verschiedenen PPS-Aufgaben und -Funktionen diente der Ermittlung der relevanten Parameter. [EVE99; WAR02; TEM08] präsentierten in ihren Arbeiten unterschiedliche Formeln und Verfahren für die Durchführung der einzelnen PPS-Funktionen. Diese Methoden und Formeln werden an dieser Stelle nicht detailliert ausgeführt. Vielmehr werden die abgeleiteten relevanten Parameter in Tabelle 5-2 zusammengefasst.

Prinzipiell wird zwischen zwei verschiedenen Typen von Parametern unterschieden:

- Parameter, die sich erst nach der Auswahl einer Methode bzw. eines Verfahrens ergeben, und
- Parameter, die unabhängig davon immer im PPS-System einzustellen sind.

Beispiele für den ersten Parametertyp sind die Größen *Bestellperiode (t)* und *Bestellmenge (q)*, wenn die Beschaffung nach der sogenannten Bestellrhythmus-Losgrößen-Politik erfolgt. Weil die Bestellung nach jeder Periode (t) für eine fixe Bestellmenge (q) erfolgt, wird dieses Bestellverfahren auch als (t,q)-Politik bezeichnet. Die Parameter (t) und (q) werden daher nicht immer in einem PPS-System einzustellen sein. Vielmehr ist das Bestellverfahren der relevante Einstellparameter.

Tabelle 5-2: Planungsaufgaben und relevante PPS-Parameter

PPS-Aufgabe	PPS-Funktion	Relevante Parameter
Produktionsprogrammplanung		
Absatz und Produktionsprogramm-planung	▪ Absatzplanung ▪ Produktionsprogrammplanung	- Planungsfrequenz - Planungshorizont - Planungsvorlauf - Strategie der Bedarfs-ermittlung - Sicherheitsbestand im Warenausgangslager
Produktionsbedarfsplanung		
Materialdisposition	▪ Bedarfsermittlung	- Sicherheitsbestand - Zeithorizont
Produktionsplanung	▪ Losgrößenrechnung ▪ Fertigungsauftragsterminie-rung ▪ Kapazitätsplanung	- PPS-Methoden/ -Verfahren - Primärbedarf - Material-/Herstellkosten - Fertigungslosgröße - Mittlere Durchlaufzeiten - Mittlere Übergangszei-ten - Mittlere Auftragsdurch-laufzeiten - Maximale Kapazität
Eigenfertigungsplanung und -steuerung		
Produktionssteue-rung	▪ Reihenfolgeplanung/Fein-terminierung	- Verfahren/Methode - Maschinenstörungen

	▪ Fertigungsauftragsfreigabe ▪ Fertigungsauftrags-/Ressourcenüberwachung	- Personal-/Werkzeugausfall - Prioritätsregeln
Fremdbezugsplanung und -steuerung		
Beschaffung und Einkauf	▪ Bestellmengenermittlung	- Bestellpolitik - Wiederbeschaffungszeit - Sicherheitsbestand im Wareneingangslager

Die Durchführungs- oder Übergangszeiten sind dagegen Parameter, die unabhängig vom ausgewählten Terminierungsverfahren im PPS-System eingestellt werden müssen. Solche Parameter bilden mit der Auswahl der Methode bzw. des Verfahrens für jede Funktion die relevanten PPS-Parameter.

Die Absatz- und Produktionsprogrammplanung verfolgen das Ziel, ein möglichst realisierbares Produktionsprogramm für eine vordefinierte Periode zu planen.

Die Produktionsprogramme werden grundsätzlich rollierend und in gleichmäßigen Zeitabständen für einen gleichbleibenden Zeithorizont erstellt. Die *Planungsfrequenz* und der *Planungshorizont* sind daher zwei entscheidende Planungsparameter für die Generierung bzw. Erfassung der Absatz- sowie Produktionsprogrammpläne. Weil die Funktionen der Absatz- und Produktionsprogrammplanung in die Zukunft vorausschauen, ist der Parameter *Planungsvorlauf* eine weitere relevante Einstellgröße. Der Planungsvorlauf ist die Zeit zwischen dem Planungszeitpunkt und dem Beginn des Planungshorizonts und dient dazu, Fertigungsaufträge rechtzeitig zu bilden und entsprechend freizugeben.

Je nach Strategie der Bedarfsermittlung dient die Absatzplanung dem Zweck, Umsatz- oder Absatzpläne zu erfassen oder aus Statistik- bzw. Echtdaten zu generieren. Es wird hauptsächlich zwischen der bedarfs- und der verbrauchsgesteuerten Bedarfsermittlung unterschieden. Die Einstellung der *Bedarfsermittlungsstrategie* im PPS-System ist ein weiterer entscheidender Planungsparameter.

Voraussetzung für die bedarfsgesteuerte Bedarfsermittlung ist das Vorliegen realer Kundenaufträge oder von Rahmenverträgen, auf deren Basis Bedarfe exakt nach Menge und Termin ermittelt werden können. Die bedarfsgesteuerte Bedarfsermittlung erfolgt deterministisch. Hierfür kann das Dispositionsstufen-, Fertigungsstufen-, Renetting- oder das Gozinto-Verfahren verwendet werden [DOM05, HOP07, WAN07]. Die Auswahl des geeigneten Verfahrens ist somit ein weiterer Planungsparameter, der sich auf den Absatzplan entscheidend auswirkt. Die deterministische Bedarfsermittlung wird

i. d. R. bei hochwertigen oder kundenspezifischen Produkten, wie z. B. in der Automobilindustrie, eingesetzt [DIE06].

Die verbrauchsgesteuerte Bedarfsermittlung bedeutet dagegen, dass der künftige Bedarf entweder abgeleitet aus den Vergangenheitswerten oder basierend auf subjektiven Schätzungen bzw. Marktstudien vorhergesagt wird. Es ist hierbei zwischen der stochastischen und heuristischen Bedarfsermittlung zu unterscheiden [MER05, TEM08].

Die stochastische Bedarfsermittlung basiert auf statistischen Auswertungen und wird i. d. R. bei Produkten mit längeren Durchlauf- als Lieferzeiten benötigt. Darüber hinaus ist diese Strategie für geringwertige oder standardisierte Produkte geeignet. Für die stochastische Bedarfsermittlung bietet sich eine Vielzahl an Prognoseverfahren an, die sich als qualitative und quantitative Techniken einordnen lassen.

Bei der heuristischen Bedarfsermittlung geht es um eine subjektive Schätzung des erwarteten Bedarfs in der Zukunft. Diese Strategie findet häufig Anwendung bei neuen Produkten, für die nicht ausreichende Daten für die stochastische Ermittlung vorliegen, oder bei alten Produkten mit einem sehr hohen Absatzpotenzial wie z. B. in der Luftfahrtbranche [SPR07].

Nach der Absatzplanung erfolgt die Produktionsprogrammplanung, auch Primärbedarfsplanung genannt, welche der Festlegung von Mengen und Fertigungsterminen der Enderzeugnisse (Primärbedarf) dient. Der Primärbedarf wird unter Berücksichtigung der Lagerbestände an Zukaufteilen und Fertigprodukten sowie der laufenden Produktionsaufträge ermittelt. Daher stellt der *Sicherheitsbestand* an Zukaufteilen und Fertigprodukten einen weiteren relevanten Planungsparameter dar.

Ausgehend vom Primärbedarf (Produktionsmenge) wird in der Materialbedarfsplanung ermittelt, wie viele Mengeneinheiten an Rohstoffen und Zwischenprodukten (Sekundärbedarf) zur Deckung des Primärbedarfs gekauft oder hergestellt werden müssen. Der *Sicherheitsbestand* an den Teilen des Sekundärbedarfs ist für die Ermittlung des Nettobedarfs entscheidend und ist somit ein weiterer relevanter Planungsparameter.

In Abhängigkeit vom *Primärbedarf* werden anschließend die Fertigungslose gebildet. Dies wird auf sehr unterschiedliche Art und Weise durchgeführt. In vielen Fällen werden die Losgrößen basierend auf dem Erfahrungswissen des Planers einmalig in das System eingegeben. Erst wenn sich der eingestellte Wert als deutlich unwirtschaftlich erkennen lässt, wird dieser verändert. In der Regel werden aber die wirtschaftlichen Losgrößen entweder stochastisch oder deterministisch ermittelt.

Für die stochastische Losgrößenrechnung bietet sich eine Vielzahl an Verfahren an. Auch wenn sie sich in den Details unterscheiden, versuchen sie das Dilemma zwischen hohen Umlaufbeständen bei großen Losen und hohen Rüstzeiten und -kosten bei kleinen Losen wirtschaftlich zu lösen. Die folgende Tabelle 5-3 resümiert die typischen Modelle zur Losgrößenrechnung sowie deren relevante Parameter [NYH91; HOP08].

Die Losgrößenrechnung gewinnt an Bedeutung, weil sie auf verschiedene unternehmerische Zielsetzungen auswirkt. Die meisten Losgrößenverfahren zielen auf die Minimierung der losgrößenabhängigen Kosten ab. Dies sind hauptsächlich die Rüst- und die

Bestandskosten [LÖD05]. Nyhuis hat in seiner Arbeit [NYH91] die typischen Verfahren beschrieben und ihre Grenzen dargestellt.

Tabelle 5-3: Modelle zur Losgrößenberechnung

Modell	Formel	Parameter
Andler	$X_0 = \sqrt{\frac{2 * M * K_R}{K_L * T}}$	M: Bedarfsmenge K_R: Rüstkosten K_L: Lagerhaltungs-kostensatz T: Periodenlänge p: Preis m: Materialkosten m_0: Herstellkosten FG: Flussgrad te: Bearbeitungszeit KAP: Kapazität
Wagner-Within	$X_0 = \frac{dK}{dx}$ $K = \left(K_R . \frac{M}{X} \right) + \sum_{j=2}^{n} M . \sum_{i=1}^{j-1} \left(X . K_L . \frac{T_i}{2} \right)$ n Anzahl der Periodenintervalle	
DoLos	$X_0 = \sqrt{\frac{200 . M . \sum_{i=1}^{n} K_R}{p . m + \left(\frac{(m + m_0) . p . M . FG}{60 . UZ} . \sum_{i=1}^{n} \frac{te_i}{KAP} \right)}}$	

Das Andler Modell berechnet die Losgröße, bei der die Summe aus Rüst- und Lagerhaltungskosten ein Minimum erreicht. Dabei wird von einer einstufigen Fertigung ausgegangen, und die Kapazitätsrestriktionen werden nicht berücksichtigt.

Das Wagner-Within Modell stellt ein exaktes Verfahren zur Bestimmung der optimalen Losgröße für ein Produkt mit dynamischer Nachfrage dar. Dabei trifft es die gleichen Annahmen wie bei der klassischen Losgrößenformel (Andler Modell).

Nyhuis untersuchte die Auswirkung der Losgröße auf den zur Auslastung der Arbeitssysteme erforderlichen Umlaufbestand in der Fertigung. Bei seinem Verfahren zur Durchlauforientierten Losgrößenbestimmung (DoLos) ergänzt er die vorigen Modelle um die Kosten des Bestands in der Fertigung.

Durch eine neue Technologie können die Rüst- (K_R), Material- (m) sowie Herstellkosten (m_0) und die Bearbeitungszeit (te) beeinflusst werden. Bei der Technologieänderung werden die entsprechenden Anlagen durch neuen ersetzt, die unterschiedliche Rüst- und Bearbeitungszeiten haben können. Dies resultiert in unterschiedlichen Rüst- und Herstellkosten. Außerdem kann die neue Technologie ein anderes Produktmaterial erfordern, woraus andere Materialkosten resultieren.

Bei der heuristischen Losgrößenermittlung werden i. d. R. periodische Bedarfe zu Losen zusammengefasst. Es werden Schicht-, Tages- oder Wochenlosgrößen bei der Berücksichtigung einer minimalen sowie maximalen Losgröße definiert. Die *Periodenlänge* ist dabei einer der relevanten Parameter. Die minimale sowie maximale Losgröße sind abhängig von Restriktionen zu definieren, wie z. B. der *Werkzeugstandmenge*.

Bei der Fertigungsauftragsterminierung werden früheste und späteste Termine für die Durchführung der einzelnen Arbeitsvorgänge eines Fertigungsauftrags geplant. Die entscheidenden Planungsparameter hierfür sind die *mittleren Rüst-*, *Bearbeitungs-*, *Warte-* und *Transportzeiten*. Die Rüst- und Bearbeitungszeit werden für jeden Arbeitsvorgang in den Stammdaten des Systems hinterlegt [SCH06a]. Die Warte- und Transportzeit werden je nach Terminierungsverfahren der Kapazität zugeordnet. Ein weiterer relevanter Planparameter für die Durchlaufterminierung ist die Auswahl des *Terminierungsverfahrens*. Hierfür ist zwischen der Vorwärts-, Rückwärts- und Mittelpunktterminierung zu unterscheiden.

Weil bei der Durchlaufterminierung zunächst von einer unbegrenzt vorhandenen Kapazität ausgegangen wird, die Fertigungskapazität aber tatsächlich begrenzt ist, muss die Frage geklärt werden, ob die erforderlichen Kapazitäten für das Produktionsprogramm zur Verfügung stehen. Hierfür ist die Kapazitätsbedarfsermittlung sowie -abstimmung notwendig. Die Kapazitätsbedarfsermittlung dient der Ermittlung des Kapazitätsbedarfs basierend auf den bereits terminierten Fertigungsaufträgen. Bei der Kapazitätsabstimmung wird anschließend der ermittelte Kapazitätsbedarf der verfügbaren Kapazität gegenübergestellt [WIE05a]. Die Diskrepanzen zwischen dem Kapazitätsbedarf und der tatsächlich verfügbaren Kapazität müssen dann ausgeglichen werden. Dies erfolgt entweder durch Erhöhung der zur Verfügung stehenden Kapazität (Kapazitätsanpassung) durch z. B. Überstunden und Sonderschichten, durch zeitliche Verschiebung von Fertigungsaufträgen (Kapazitätsabgleich) oder durch Fremdvergabe bzw. Auslagerung einzelner Arbeitsvorgänge. Die Einstellung der *maximal verfügbaren Kapazität* z. B. durch Definition des Schichtmodells stellt hierfür einen relevanten Planparameter dar.

Sobald dies geschehen ist, können die bereits terminierten Fertigungsaufträge an die Produktionssteuerung weitergegeben werden.

Im Anschluss an die Termin- und Kapazitätsplanung erfolgt die Produktionssteuerung, deren Aufgaben die Auftragsfreigabe, Reihenfolgeplanung, Feinterminierung sowie Fertigungsauftrags- und Ressourcenüberwachung umfassen.

Kurzfristige Aufgaben der Feinplanung, deren Ziel die Zuordnung bestimmter Aufträge zu den Maschinen ist, sind hauptsächlich in Zusammenhang mit kurzfristigen Änderungen in der Auftrags- oder Kapazitätsrealität zu sehen. Solche Änderungen können z. B. aus ungeplanten Ausfällen einer Maschine oder Anlage bzw. eines Mitarbeiters sowie aus unerwarteten Kundenaufträgen mit hoher Priorität resultieren. Die relevanten Planparameter *Maschinenstörungen*, *Personal-* bzw. *Werkzeugausfall* sowie *Prioritätsregeln* werden nur auf Basis von Erfahrungswerten im System eingestellt.

Die einzelnen Arbeitsvorgänge der für eine Planungsperiode feinterminierten Fertigungsaufträge bilden an den entsprechenden Maschinen Warteschlangen. Die Reihenfolgeplanung zielt darauf ab, basierend auf ausgewählten Kriterien, eine optimale Abarbeitungsreihenfolge dieser Warteschlangen zu ermitteln. Diese Kriterien, i. d. R. festgelegte Prioritätsregeln, hängen von der ausgewählten Methode zur Reihenfolgeplanung ab. Die gängigen Methoden sind die sogenannten FIFO (First In First Out), LIFO (Last In Last Out), KOZ (Kürzeste Operationszeit), Schlupfzeitregel (der Arbeitsvorgang mit der kleinsten noch verbleibenden Zeit bis zum Endtermin des Fertigungsauftrags) und Rüstzeitoptimierung [WEB07].

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Feinplanung werden die Fertigungsaufträge freigegeben. Entscheidend hierfür ist die Festlegung von *Freigaberegeln* wie bspw. der belastungsorientierten Auftragsfreigabe [WIE91; BEC84].

5.1.1 Analytische Ermittlung der Zusammenhänge

Eine analytische Identifizierung der Zusammenhänge zwischen den logistischen Planparametern und den technologischen Einstellgrößen wird mit Hilfe von unterschiedlichen logistischen Erklärungs- und Beschreibungsmodellen ermöglicht.

In dieser Arbeit werden hierzu das eindimensionale Durchlaufelement (vgl. 2.2.2) und die Durchlauf- bzw. Fortschrittzahlendiagramme verwendet. Diese letzteren werden zuerst kurz beschrieben.

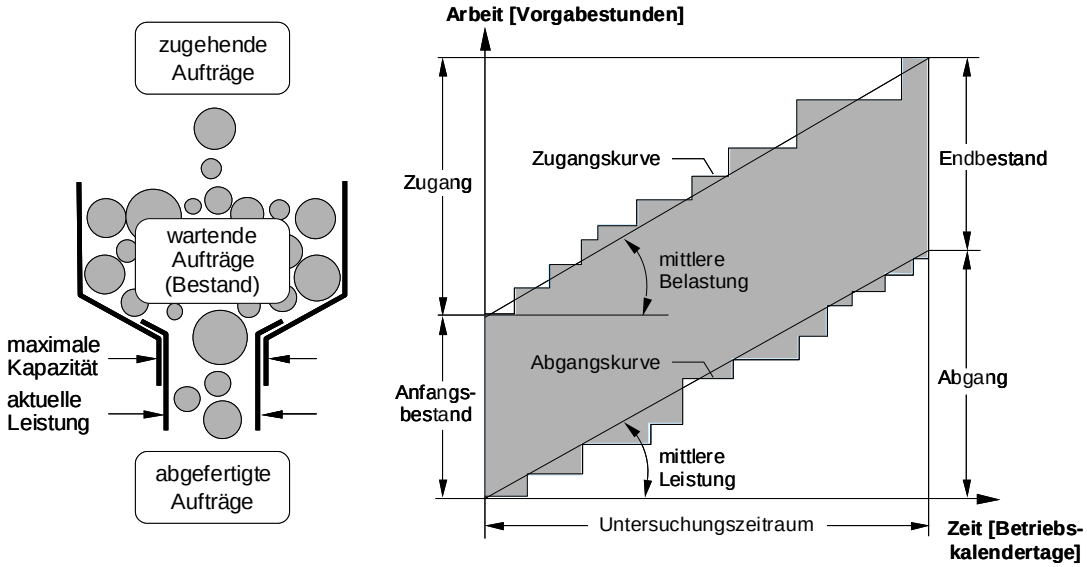


Bild 5-2: Das Trichtermodell und das abgeleitete Durchlaufdiagramm [BEC84/ WIE97]

Das Durchlaufdiagramm ist ein Beschreibungsmodell, welches aus dem Trichtermodell abgeleitet wird. Das Trichtermodell bildet die dynamischen logistischen Zusammenhänge ab. Es wurde von Bechte [BEC84] entscheidend weiterentwickelt. Die Grundidee besteht darin, die Fertigungsabläufe mit einer Vernetzung verschiedener Trichter abzubilden, die die einzelnen Arbeitssysteme in der Fertigung darstellen. Bild 5-2 zeigt das Trichtermodell sowie das daraus abgeleitete Durchlaufdiagramm.

Das Trichtermodell bildet ein Arbeitssystem mit zugehenden (Zugang), auf ihre Abfertigung wartenden (Bestand) und abgefertigten (Abgang) Aufträgen ab. Dabei kann das Arbeitssystem ein Arbeitsplatz, eine Arbeitsgruppe, ein Betriebsbereich oder die gesamte Produktion sein.

Die Aufträge werden durch Kreise mit unterschiedlichen Durchmessern symbolisiert, welche die unterschiedlichen Auftragsgrößen widerspiegeln. Nach ihrer Abfertigung fließen die Aufträge aus dem Trichter ab. Die Trichteröffnung symbolisiert dabei die

Leistung des Arbeitssystems, die innerhalb der Kapazitätsgrenzen variieren kann. Wird ein Arbeitssystem über eine längere Periode betrachtet und werden die Zu- sowie Abgänge in Form von Kurven kumuliert über die Zeit grafisch abgebildet, so entsteht das in Bild 5-2 rechts gezeigte Durchlaufdiagramm. Der Durchlauf der Aufträge durch das Arbeitssystem wird anhand der Zu- und Abgangskurve beschrieben. Der Beginn der Zugangskurve wird durch den Anfangsbestand der Bezugsperiode am betrachteten Arbeitssystem bestimmt. Die Steigung der Kurve zeigt die mittlere Belastung des Arbeitssystems. Die Steigung der Abgangskurve zeigt dagegen die in der Bezugsperiode erzielte mittlere Leistung.

Die logistischen Leistungsmerkmale lassen sich mit dem Durchlaufdiagramm exakt beschreiben. Der mittlere vertikale Abstand zwischen den beiden Kurven ergibt den mittleren Bestand. Die mittlere horizontale Distanz dagegen zeigt die mittlere Durchlaufzeit. Für eine ausführliche Beschreibung der Formeln wird auf die Literatur von Wiendahl [WIE91, WIE93, WIE97] und Nyhuis [NYH03] verwiesen.

Werden die Zu- und Abgänge im Durchlaufdiagramm in Stückzahl anstelle von Vorgabestunden kumuliert dargestellt, entsteht das sogenannte Fortschrittszahlendiagramm. In einem solchen Fortschrittszahlendiagramm können die Primärbedarfe, die Lagerbewegungen sowie die Zu- und Abgänge auf allen Produktionsstufen abgebildet werden. Dies kann sowohl in einer Rückschau auf die Ist- und Soll-Werte der Vergangenheit als auch in Form einer Vorhersage für die Zukunft erfolgen.

Das Fortschrittszahlendiagramm eignet sich dabei nicht nur für die Planung der Produktion, sondern auch für deren Monitoring.

5.1.1.1 Ermittlung der Zusammenhänge zwischen den technologischen Parametern und der Auftragsdurchlaufzeit mit dem eindimensionalen Durchlaufelement

Bild 5-3 stellt das eindimensionale Durchlaufelement einer Prozesskette mit *n* Arbeitsvorgängen dar. In diesem Beispiel entspricht der zweite Arbeitsvorgang AVG_2 dem aus einer neuen Technologie resultierenden Arbeitsvorgang. Es wird verdeutlicht, welche Zusammenhänge zwischen den technologischen Parametern *Rüstzeit*, *Prozess*- bzw. *Bearbeitungszeit* sowie *technologiebedingter Warte*- bzw*. Liegezeit* und der logistischen Kenngröße Auftragsdurchlaufzeit *ZDA* bestehen.

Die Auftragsdurchlaufzeit ergibt sich aus der Summe der Durchlaufzeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge, die u. a. die oben erwähnten technologischen Parameter beinhalten. Die folgenden Gleichungen (6) und (7) verdeutlichen den funktionalen Zusammenhang zwischen den einzelnen Zeitanteilen.

$$ZDA = \sum_{i=1}^{n} ZDL_i \tag{6}$$

$$ZDA = \sum_{i=1}^{n} \left(TL_{nach,i-1} + TT_i + TL_{vor,i} + TR_i + TB_i \right) \tag{7}$$

mit:

ZDA Auftragsdurchlaufzeit [BKT]

ZDL_i	Durchlaufzeit des Arbeitsvorgangs i [BKT]
$TL_{nach,i}$	Liegezeit nach Bearbeitung des Arbeitsvorgangs i [BKT]
TT_i	Transportzeit zum Arbeitsvorgang i [BKT]
TR_i	Rüstzeit für Arbeitsvorgang i [BKT]
TB_i	Bearbeitungszeit für Arbeitsvorgang i [BKT]
$TL_{vor,i}$	Liegezeit vor Bearbeitung des Arbeitsvorgangs i [BKT]
n	Anzahl der Arbeitsvorgänge des Auftrags [-]

Daraus resultiert, dass die Zeit zur Abfertigung eines Fertigungsauftrags mit steigender Rüst-, Bearbeitungs- oder technologiebedingter Liegezeit immer länger wird.

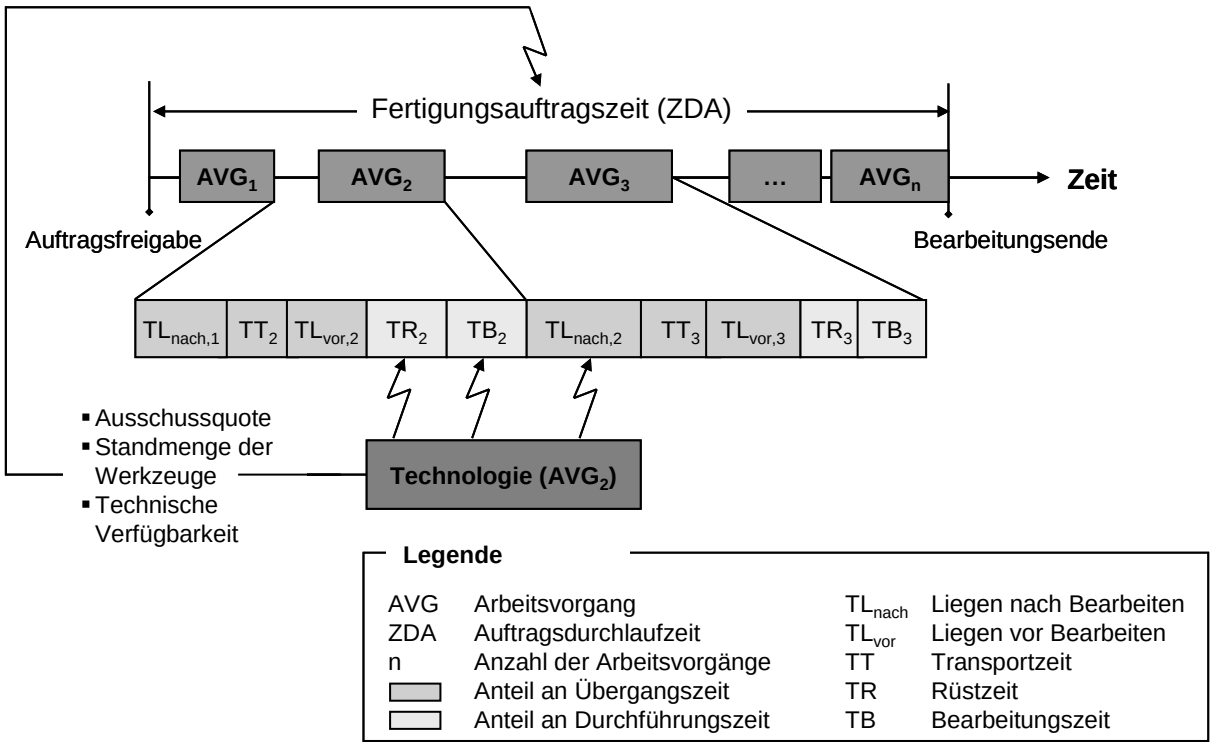


Bild 5-3: Zusammenhänge zwischen den technologischen Parametern und der Auftragsdurchlaufzeit

Die Rüstzeit an einem Arbeitsvorgang hängt hauptsächlich von der Technologie und dem Automatisierungsgrad des Rüstvorgangs ab. Resultiert aus einer Technologieänderung ein Arbeitsvorgang mit einer längeren Rüstzeit als bei der abgelösten Technologie, müssen aus logistischer Sicht die zeitlichen Anteile TB und TL_{nach} kürzer werden, um die gleiche Auftragsdurchlaufzeit zu erzielen. Ist dies nicht der Fall, so ergeben sich daraus logistische Anforderungen hinsichtlich der Bearbeitungs- und technologiebedingten Liegezeit.

In der Regel liegt das logistische Potenzial einer neuen Technologie in der kürzeren Prozess- bzw. Bearbeitungszeit, die in kürzeren Auftragsdurchlaufzeiten resultiert. Die Fertigungsaufträge werden somit schneller als bei der alten Technologie abgearbeitet, und die Kundenaufträge können schneller erfüllt werden. Mit einer neuen Technologie ist daher in diesem Fall ein logistisches Potenzial zum Erzielen einer besseren Liefertreue verbunden. Dies hängt jedoch nicht nur von der Prozesszeit der Technologie ab,

sondern auch von der Produktionsplanung und -steuerung. Die sich aus der Technologieänderung ergebenden Produktionsprozesse müssen daher logistisch beherrscht werden, um die mit der neuen Technologie verbundenen Potenziale zum Erreichen einer besseren Liefertreue auszuschöpfen.

Die dritte technologiebedingte Zeitkomponente ist die technologiebedingte Wartezeit. Einige Fertigungsprozesse, wie z. B. das Lackieren, Schmieden oder adhäsive Kleben, erfordern eine Wartezeit zum Trocknen bzw. Abkühlen. Diese Zeit resultiert in der Liegezeit nach Bearbeitung des Arbeitsvorgangs, welcher der Technologie entspricht. Diese Zeitdauer führt nicht nur zu einer Verlängerung der Auftragsdurchlaufzeit, sondern erhöht auch den Umlaufbestand in der Prozesskette. Die logistische Anforderung an die Technologie definiert daher eine Bearbeitung ohne oder, wenn unerlässlich, mit möglichst kurzer prozessbedingter Wartezeit. Dies kann erreicht werden, wenn die Technologie eine schnell trocknende Lackfarbe bzw. adhäsive Klebstoffe im Fall des Lackierens bzw. Klebens vorsieht. Neue Schmiedeverfahren führen die Wärmebehandlung aus der Restwärme durch. Durch einen gezielten Wasserstrahleinsatz wird die Abkühlzeit während der Wärmebehandlung verkürzt.

Die weiteren technologischen Parameter Ausschussquote, Standmenge der Werkzeuge sowie technische Verfügbarkeit wirken ebenso auf die Auftragsdurchlaufzeit. Diese Zusammenhänge können mit dem eindimensionalen Durchlaufelement nicht gezeigt werden und werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

5.1.1.2 Ermittlung der Auswirkungen des Ausschusses auf die logistischen Parameter im Fortschrittszahlendiagramm

In seiner Arbeit beschreibt Penz [PEN96] den funktionalen Zusammenhang zwischen der produzierten Ausschussmenge und der Auftragsdurchlaufzeit sowie ihrer Streuung. Dabei setzt er voraus, dass die Produktion von Ausschuss u. a. in Nacharbeit resultiert. Bei der Großserienfertigung werden die aus der Qualitätssicht beanstandeten Erzeugnisse verschrottet. Um die erforderlichen Ausbringungsmengen zu erreichen, bedarf es einer Überproduktion, die wiederum zu einer längeren Auftragsdurchlaufzeit als geplant führt. Mit den Fortschrittszahlen besteht eine weitere Möglichkeit zur Darstellung dieser Zusammenhänge.

Im Idealfall entspricht die Ausgangsmenge eines Prozesses exakt der Eingangsmenge des nachfolgenden Prozesses. Im realen Betrieb können jedoch bei einem nachfolgenden Prozesselement Eingangsmengen zurückgemeldet werden, die kleiner als die Ausgangsmengen des vorherigen Prozesselements sind. Die Differenz zwischen beiden Mengen entspricht der angefallenen Ausschussmenge am vorhergehenden Prozesselement. Wird diese Menge durch die gesamte produzierte Menge dividiert, ergibt sich die mittlere Ausschussquote QAm [OUA04a]. Bild 5-4 zeigt die qualitative Darstellung der Ausschussrate mit Hilfe der Fortschrittszahlen. Am Eingang des Prozesselements *PE2* werden geringere Mengen als die aus dem Prozesselement *PE1* ausgehenden Mengen zurückgemeldet. Am Ende einer Periode *P* beträgt die Differenz zwischen den beiden Fortschrittszahlen *A1.*

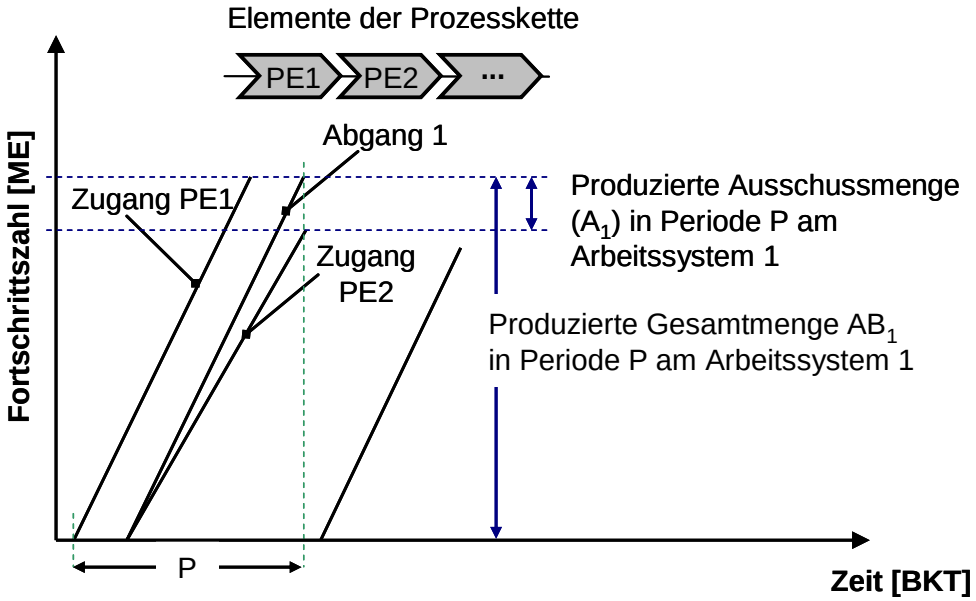


Bild 5-4: Darstellung der Ausschussquote im Fortschrittszahlendiagramm

Abgeleitet aus diesem Fortschrittszahlendiagramm wird die Ausschussquote nach der Gleichung (8) ermittelt.

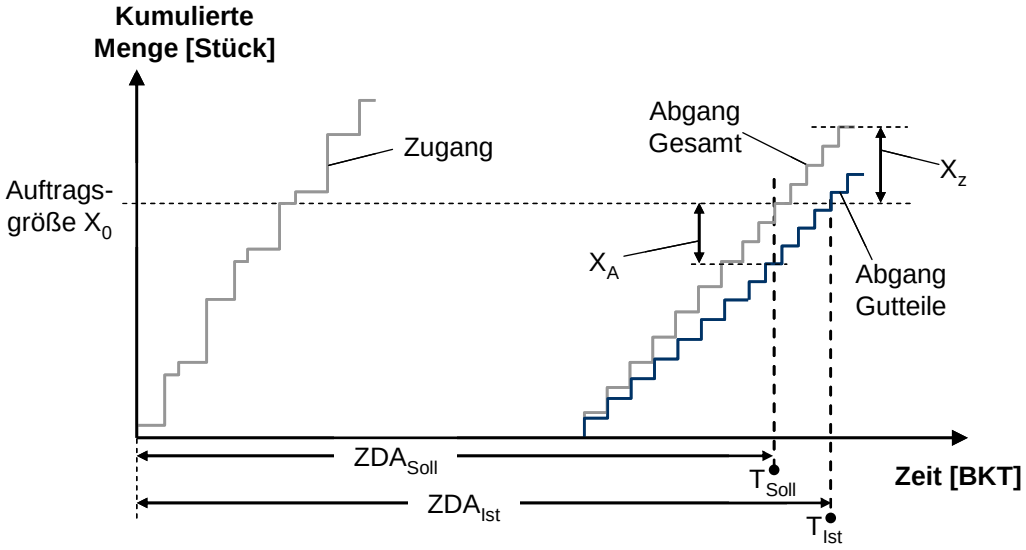
$$QAm_i = \frac{A_i}{AB_i} * 100 \qquad (8)$$

mit

QAm	mittlere Ausschussquote [%]
A_i	produzierte Ausschussmenge in Periode P am Arbeitssystem i [ME]
AB_i	produzierte Gesamtmenge in Periode P am Arbeitssystem i [ME]
i	Index Prozesselement i [-]

Voraussetzung für die hier dargestellte Messung der Ausschussrate ist allerdings, dass eine Qualitätsprüfung unmittelbar nach dem Prozess *PE1* durchgeführt wird.

Werden für alle Elemente der Prozesskette die Zugangs- sowie Abgangskurven im gleichen Diagramm dargestellt, so kann die Auftragsdurchlaufzeit abgelesen werden. Diese wird umso länger, je höher die Ausschussrate ist. Bild 5-5 zeigt ein vereinfachtes Fortschrittszahlendiagramm, das den Einfluss des produzierten Ausschusses auf die Auftragsdurchlaufzeit qualitativ visualisiert. Zum Zwecke einer vereinfachten Darstellung der Zusammenhänge wird die komplette Fertigungskette als ein *Block* dargestellt. Es werden daher nur die Zugangskurve des ersten und die Abgangskurve des letzten Prozesselements visualisiert. Nach dem letzten Prozesselement wird eine Qualitätsprüfung durchgeführt, sodass die Kurve *Abgang Gutteile* entsteht, die der kumulierten Ausbringung der Prozesskette an Gutteilen entspricht.



ZDA_{Soll}	Soll-Auftragsdurchlaufzeit	T_{Soll}	Soll-Fertigstellungstermin
ZDA_{Ist}	Ist-Auftragsdurchlaufzeit	T_{Ist}	Ist-Fertigstellungstermin
X_A	Produzierter Ausschuss	X_Z	erforderliche Zusatzmenge

Bild 5-5: Zusammenhang zwischen der Ausschussrate und den logistischen Größen

Das Beispiel in Bild 5-5 zeigt einen Fertigungsauftrag mit der Menge X_0. Zum Zeitpunkt T_{soll} wurde die letzte Einheit dieses Auftrags am Abgang zurückgemeldet. Dieser Zeitpunkt entspricht gleichzeitig dem geplanten Fertigstellungstermin des Auftrags. Nach der Qualitätsprüfung wurde die Menge X_A beanstandet. Es ist daher erforderlich, eine zusätzliche Menge X_Z zu produzieren, um X_A auszugleichen und somit den Fertigungsauftrag zu erfüllen. Dies verlängert die Auftragsdurchlaufzeit um die Zeitspanne T_{Ist} - T_{Soll}. Die zusätzliche Menge X_Z wird nach Gleichung (9) ermittelt.

$$X_Z = \frac{X_A}{QAm} \tag{9}$$

mit

QAm	mittlere Ausschussquote [%]
X_Z	erforderliche Zusatzmenge zum Ausgleich des Ausschusses [ME]
X_A	produzierte Ausschussmenge [ME]

Bei der Ermittlung von X_Z ist zu berücksichtigen, dass es zu einer weiteren Produktion von Ausschuss kommen wird. Deshalb ist diese Zusatzmenge größer als die auszugleichende Ausschussmenge X_A.

Zusätzlich zu seinem Einfluss auf die Auftragsdurchlaufzeit wirkt der Ausschuss negativ auf die Ausbringung und den Bestand. Am Ende einer Periode P werden immer geringere Abgänge zurückgemeldet als geplant, weil die Abgangskurve an Gutteilen immer unterhalb der Kurve der gesamten Ausbringung einer Prozesskette verläuft.

Ferner verursacht eine hohe Ausschussrate einen höheren Umlaufbestand. Es wird nämlich stets überproduziert, um die erforderliche Auftragsmenge an Gutteilen zu realisieren. Dies resultiert wiederum in höheren Kosten.

5.1.2 Korrelationsanalyse logistischer und technologischer Parameter

Die Korrelationsanalyse ist eine weit verbreitete Methode zur Untersuchung von möglichen Zusammenhängen zwischen zwei oder mehr statistischen Variablen.

Im Rahmen verschiedener Messreihen werden die Werte von zwei Variablen X und Y in einem kartesischen Diagramm dargestellt. Es soll dabei untersucht werden, wie die Variable Y von X abhängt. Deshalb werden die X-Werte auf der Abszissen- und die entsprechenden Y-Werte auf der Ordinatenachse eingetragen. Es wird zwischen drei Korrelationstypen unterscheiden. Bild 5-6 zeigt diese unterschiedlichen Korrelationstypen anhand der zwei statistischen Variablen X und Y.

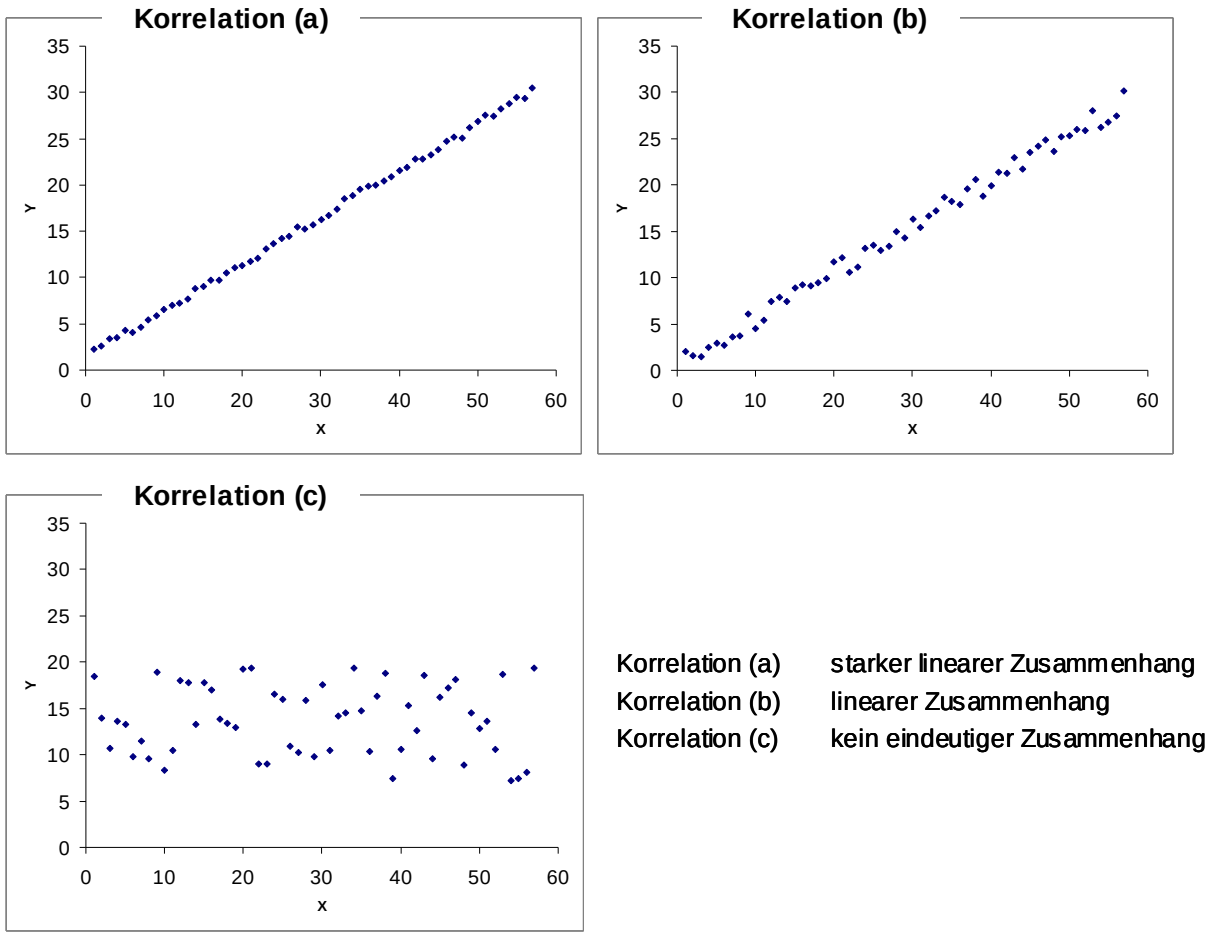


Bild 5-6: Mögliche Korrelationen zwischen zwei statistischen Variablen X und Y

Die Korrelation (a) deutet auf einen starken Zusammenhang zwischen den beiden Variablen hin. In dem dargestellten Beispiel ist der Zusammenhang linear und positiv. Der Y-Wert steigt kontinuierlich mit dem wachsenden X-Wert. Ein starker Zusammenhang kann auch negativ sein (je mehr, desto weniger). Ein Beispiel hierfür ist der Rückgang des Verkaufs von Sonnencreme mit dem Anstieg des Regenschirmverkaufs. Zusätzlich

zum linearen Verlauf kann eine starke Korrelation auch einen exponentiellen oder logarithmischen Verlauf haben.

Die Korrelation (b) zeigt ebenso einen positiven Zusammenhang zwischen den Variablen X und Y. Der Zusammenhang ist jedoch nicht so stark wie in der Korrelation (a), weil die Y-Werte nicht stetig steigen bei steigendem X-Wert. Dies zeigt zwar eine Abhängigkeit zwischen den beiden Variablen, bedeutet aber in der Regel, dass es noch mindestens eine weitere Variable gibt, die sich auf die Y-Werte auswirkt.

Die dritte Korrelation (c) zeigt keine deutliche Abhängigkeit zwischen den beiden Variablen.

In diesem Abschnitt der Arbeit wird die Korrelationsanalyse zur Ermittlung möglicher Zusammenhänge zwischen dem technologischen Parameter *Werkzeugstandmenge* und den logistischen Größen *mittlere Auftragsdurchlaufzeit* und *mittlere Terminabweichung* verwendet.

Mit Hilfe der Materialflusssimulation wird eine Prozesskette zum Schmieden von Lkw-Vorderachsen abgebildet und die Produktion bei unterschiedlichen Einstellungen der technologischen Parameter simuliert. Anschließend werden die logistischen Zielgrößen gemessen und mit den technologischen Parametern in Korrelationsdiagrammen dargestellt.

5.1.2.1 Versuchsaufbau zur Analyse von Korrelationen zwischen technologischen und logistischen Parametern

Bei einem osteuropäischen Schmiedeunternehmen, welches sich auf die Produktion einbaufertiger Schmiedeteile für Lastkraft- und Nutzfahrzeuge spezialisiert hat, wurden die internen Prozesse untersucht und simulativ nachgebildet. Im Rahmen der Untersuchung sollten technologische und logistische Maßnahmen erarbeitet werden, um die gesamte Logistikleistung zu verbessern. Die Hauptziele waren dabei die Erhöhung der jährlichen Ausbringung, Reduzierung der Umlaufbestände, Erhöhung der Produktivität und Verbesserung der Liefertreue in Bezug auf Menge und Termin. Bei der Validierung der erarbeiteten Verbesserungsmaßnahmen wurde die Korrelation zwischen den technologischen Parametern und den logistischen Zielgrößen untersucht. Daraus wurden technologische Anforderungen wie z. B. die technische Verfügbarkeit der Anlagen oder die Standmenge der Werkzeuge abgeleitet.

Der Schmiedebereich besteht aus 13 unterschiedlichen Fertigungslinien, die der Produktion von ca. 500 unterschiedlichen Produkten mit einer Gewichtsstreuung zwischen 0,25 und 120 kg dienen. 12 dieser Fertigungslinien haben am Ende der Fertigungskette gemeinsame Anlagen, wie z. B. Sandstrahl- oder Rissprüfanlagen.

Die dreizehnte Schmiedelinie diente ausschließlich der Produktion von Vorderachsen und hat weder gemeinsame Anlagen noch gemeinsame Mitarbeiter mit den anderen 12 Fertigungslinien. Für die Korrelationsanalyse in diesem Abschnitt wird ausschließlich auf diese Prozesskette fokussiert (Bild 5-7).

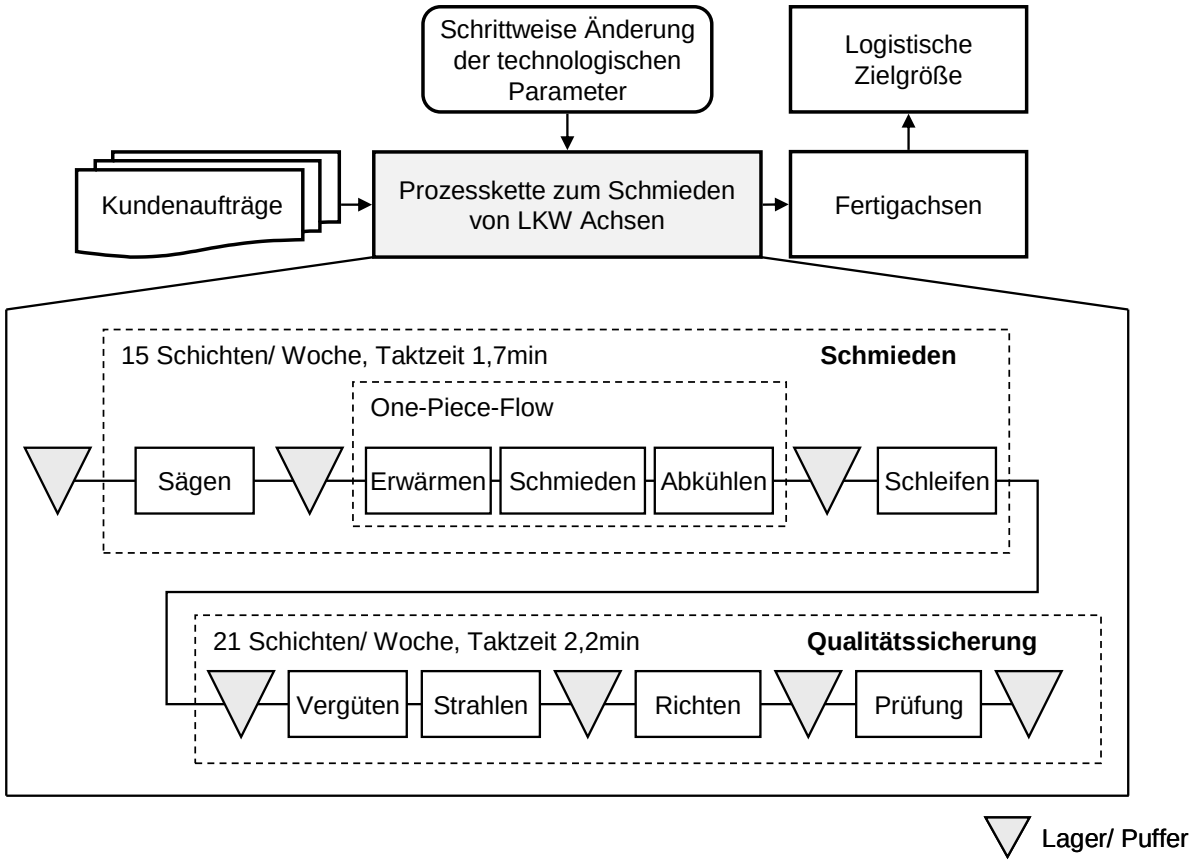


Bild 5-7: Prozesskette zum Schmieden von Lkw-Vorderachsen

Die Fertigung der Vorderachsen besteht aus den zwei Teilprozessketten „Schmieden“ und „Qualitätssicherung“. Die Teilprozesskette „Schmieden“ beginnt mit dem Prozessschritt *Sägen*. Hierfür stehen 4 Kreissägen zur Verfügung. Nach dem *Sägen* werden die Halbzeuge in Transportbehältern aufgestapelt, bevor sie vereinzelt zum *Erwärmen* gehen. Die Handhabung zwischen diesen beiden Prozesselementen erfolgt maschinell durch einen von einem Werker bedienten Roboter. Die vereinzelten Halbzeuge durchlaufen sequenziell den Induktionsofen und werden auf die Schmiedetemperatur von ca. 1.200 Grad erhitzt. Anschließend werden sie automatisch zur Schmiedepresse weitergegeben und nach verschiedenen Umformschritten zu Vorderachsen geschmiedet. Das Prozesselement des *Schmiedens* besteht aus den einzelnen Schritten *Reckwalzen*, *Vorformen*, *Gesenkschmieden* (fertig Formen), *Abgraten* und *Einprägen*. Diese Teilschritte sind starr verkettet und haben eine Taktzeit von 1,7 Minuten je Schmiedeteil. Nach dem Schmieden werden die noch heißen Achsen automatisch in eine Hängebahn gehängt und auf Raumtemperatur abgekühlt. Nach dem *Abkühlen* werden die Schmiedeteile in Transportbehältern gestapelt, bevor sie mit einem Gabelstapler zum nächsten Prozesselement *Schleifen* transportiert werden. In jedem Transportbehälter können bis zu 32 Achsen aufgestapelt werden. Für das Schleifen stehen zwei Arbeitsplätze zur Verfügung, und die Arbeit läuft manuell. Im Anschluss an das Schleifen werden die Achsen wieder in Behältern gestapelt und zur zweiten Teilprozesskette transportiert. Die Teilprozesskette „Schmieden“ ist gekennzeichnet durch einen linearen Materialfluss und läuft in 15 Schichten pro Woche.

Die Teilprozesskette „Qualitätssicherung“ beginnt mit dem Prozesselement *Vergüten*. Die Vergütung erfolgt in einem Durchlaufofen mit einem Ausbringungstakt von 2,2 Minuten je Achse. Aus wirtschaftlichen Gründen soll der Vergütungsofen in Dauerbetrieb bleiben. Deshalb läuft diese Teilprozesskette in 21 Schichten pro Woche. Nach der Vergütung durchlaufen die Achsen vereinzelt aufgehängt eine Durchlaufstrahlanlage. Anschließend werden die geschmiedeten Achsen in Behältern zum *Richten* und abschließend zur *Rissprüfung* transportiert.

Die auf dieser Fertigungslinie produzierte Gesamtmenge beträgt ca. 170.000 Teile pro Jahr und ist die Summe der jährlichen Kundenbedarfe für 12 unterschiedliche Vorderachsen. 2 dieser 12 Produkte sind mit 82 % der Summe die A-Teile, 4 sind die B-Teile und die restlichen 6 repräsentieren mit einem Gesamtanteil von 5 % die C-Teile.

Die unterschiedlichen Vorderachsen haben sehr ähnliche Bauformen, dennoch variiert ihr Nettogewicht zwischen 86 und 120 kg. Die Bearbeitungszeiten der verschiedenen 12 Produkte sind ungefähr gleich. Jeder Produktwechsel bedarf dagegen einer Umrüstung der Schmiedepresse, deren Aufwand je nach Bauteil zwischen 3 und 5 Stunden variiert.

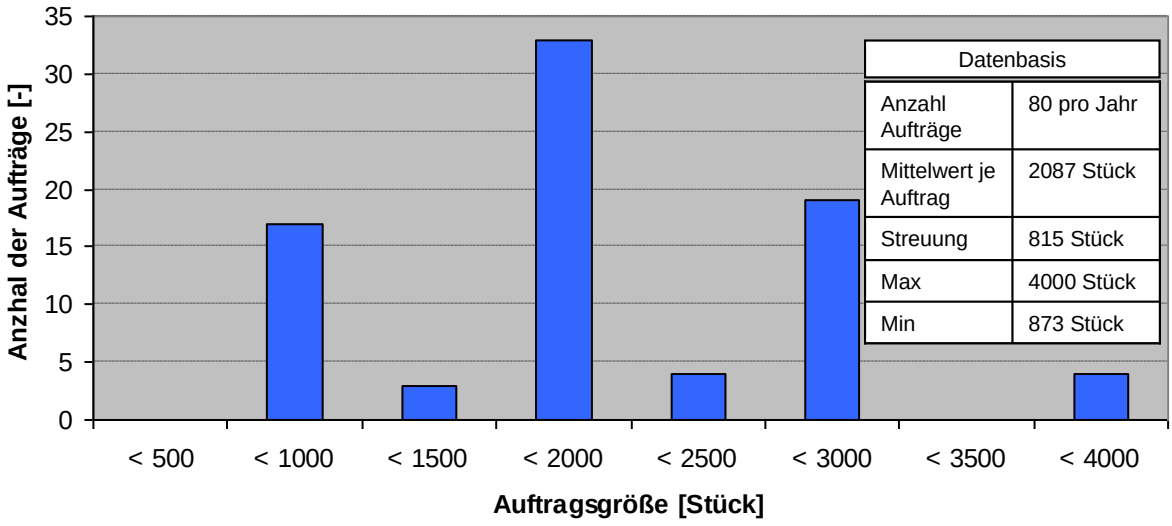


Bild 5-8: Streuung der Kundenauftragsgröße

Zum Starten der Simulationsversuche wurde das Produktionsvolumen des Jahres 2005 als Basis genommen. Bild 5-8 zeigt die Streuung der Kundenauftragsgröße. 2005 wurden 80 Kundenaufträge erfüllt. Die Auftragsmenge variierte zwischen 873 und 4.000 mit einer Standardabweichung von 815 Achsen. Der Mittelwert der Auftragsgröße lag bei 2.087 Stück. Die häufigste Auftragsgröße lag mit 34 Kundenaufträgen zwischen 1.500 und 2.000 Stück. 19 Aufträge hatten eine Auftragsgröße zwischen 2.500 und 3.000 Stück und 17 weitere Aufträge hatten eine Größe um die 1.000 Stück. Die restlichen wenigen Aufträge hatten unterschiedliche Größen bis zu 4.000 Stück.

Aus diesen Kundenaufträgen wurden Teilmengen von den Kunden abgerufen, die in regelmäßigen Abständen geliefert wurden. Insgesamt resultierten daraus im Jahr 258

Teillieferungen mit einer mittleren Größe von 666 und einer Standardabweichung von 157 Stück.

5.1.2.2 Simulationsablauf und Diskussion der Ergebnisse

Die in Bild 5-7 gezeigte Schmiedelinie zur Fertigung von Vorderachsen wurde mit Hilfe des Programms eM-Plant simuliert. Dabei wurden sowohl die beim Schmiedeunternehmen verwendeten Methoden zur Produktionsplanung und -steuerung als auch die vorgegebenen Rahmenbedingungen für die Dimensionierung der Zwischenpuffer berücksichtigt. Basierend auf dem PPS-Verfahren MRP wurden die Fertigungsaufträge generiert, die sofort freigegeben wurden.

Die Aufträge wurden nach dem FIFO-Prinzip gefertigt. Die Fertigungslosgröße wurde nach keinem der bekannten Losgrößenrechnungsverfahren berechnet, sondern es wurden gleich 1.000 Stück im PPS-System eingestellt. Basis für die Ermittlung dieser Losgröße war die Idee, dass es alle zwei Tage einen Produktwechsel geben sollte. In Ausnahmefällen wurden einige Fertigungsaufträge unterbrochen, und andere sogenannte „Eilaufträge“ wurden priorisiert. Die mittlere Fertigungslosgröße betrug 994 Stück. Sie variierte zwischen 476 und 1.200 mit einer Standardabweichung von 72 Stück.

Um die Korrelation zwischen der Werkzeugstandmenge und den logistischen Größen zu ermitteln, wurde der Wert dieses technologischen Parameters schrittweise im Simulationsmodell geändert, und es wurde anschließend neu simuliert. Ausgehend von einem Wert von 500 wurde der Einstellparameter zuerst kontinuierlich um 100 erhöht bis zu einem Wert von 1.000 Stück. Dann wurde der Wert schrittweise um 250 erhöht bis zu einem maximalen Wert von 5.000 Stück. Es resultierten somit 22 Versuchsläufe. Die reale Standmenge der Werkzeuge im betrachteten Schmiedeunternehmen betrug ca. 2.000 Stück. Der darauf folgende Werkzeugwechsel wurde mit 300 Minuten angenommen.

Nach jedem Simulationslauf wurden die Simulationsergebnisse ausgewertet. Ein Simulationslauf dauerte ca. 10 Minuten. Als Erstes wurde die Abhängigkeit der mittleren Auftragsdurchlaufzeit von der Werkzeugstandmenge untersucht.

Bild 5-9 stellt die Abhängigkeit dieser beiden Größen voneinander dar, welche einen starken Zusammenhang zeigt. Die mittlere Auftragsdurchlaufzeit wird immer kürzer, je höher die Werkzeugstandmenge ist. Bei einer Standmenge der Werkzeuge von 1.000 Stück beträgt die mittlere Auftragsdurchlaufzeit 731,8 Stunden, was 30,49 Tagen entspricht. Wird die Standmenge auf 2.000 Stück erhöht, so verkürzt sich die mittlere Auftragsdurchlaufzeit um 44,52 % und beträgt nur noch 406 Stunden bzw. 16,92 Tage. Bei einer Werkzeugstandmenge von 3.000 Stück wird die mittlere Auftragsdurchlaufzeit um weitere 27,23 % kürzer und beträgt 285,4 Stunden bzw. 12,31 Tage.

Beim Korrelationsdiagramm wird dennoch deutlich, dass die mittlere Auftragsdurchlaufzeit einen Wert von 229,9 Stunden (9,58 Tagen) nicht unterschreitet, obwohl die Summe aller Durchführungszeiten der einzelnen Prozesselemente nur 20,26 Stunden beträgt. Das bedeutet, dass, obwohl die mittlere Auftragsdurchlaufzeit von der Werkzeugstandmenge abhängt, diese letztere Größe nicht allein entscheidend für die

Verkürzung der mittleren Auftragsdurchlaufzeiten ist. Während sich eine Anforderung an eine Erhöhung der Standmenge der Werkzeuge im niedrigen Bereich entscheidend auswirkt, sind bei hohen Werten der Werkzeugstandmenge weitere logistische Maßnahmen erforderlich, um die Auftragsdurchlaufzeit zu verkürzen. Diese Maßnahmen sollen z. B. darauf abzielen, den mittleren Umlaufbestand zu verringern, um somit die Übergangszeiten zwischen den verschiedenen Prozesselementen zu verkürzen.

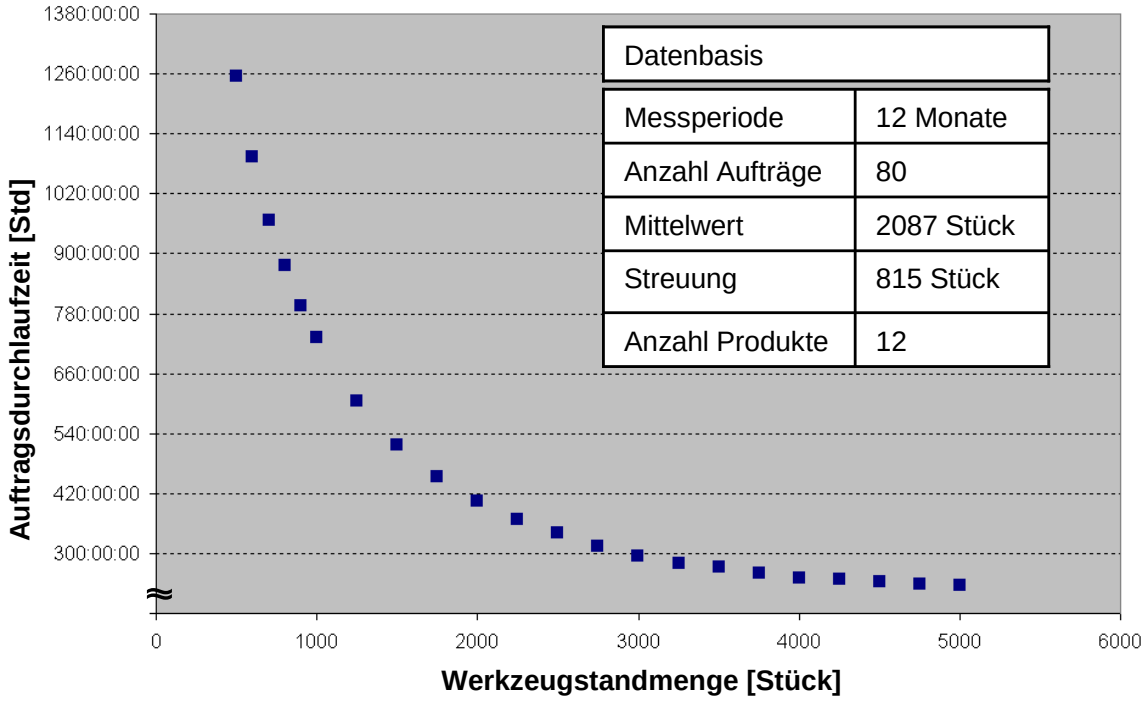


Bild 5-9: Korrelation zwischen der Werkzeugstandmenge und der mittleren Auftragsdurchlaufzeit

Im zweiten Schritt wurde die Auswirkung der Werkzeugstandmenge auf die mittlere Terminabweichung im Abgang ermittelt. Hierfür wurde zuerst die Differenz zwischen dem Plan- und Ist-Fertigstellungsdatum aller Fertigungsaufträge gemessen, und anschließend wurde die mittlere Fertigstellungsterminabweichung berechnet. Das Plan-Fertigstellungsdatum wurde automatisch vom schmiedeunternehmenseigenen PPS-System berechnet. Das Ist-Datum dagegen wird aus dem Simulationsmodell zurückgemeldet. Bild 5-10 zeigt die Korrelation zwischen der mittleren Terminabweichung im Abgang und der Werkzeugstandmenge.

Auch in diesem Fall ist eine starke Korrelation zwischen beiden Größen zu erkennen. Eine geringere Terminabweichung im Abgang kann mit einer steigenden Standmenge der Werkzeuge erreicht werden. Bei einer Werkzeugstandmenge von 1.000 Stück werden die Fertigungsaufträge im Durchschnitt 30,5 Tage zu spät abgefertigt. Eine Verdopplung der Standmenge resultiert in einer Verringerung der Terminabweichung um 44,61 %.

Ähnlich wie bei der Untersuchung der Einflüsse auf die mittlere Auftragsdurchlaufzeit ist aus dem Korrelationsdiagramm eine Grenze zu erkennen, ab der eine Erhöhung der

Werkzeugstandmenge nur zur marginalen Verbesserung der Terminabweichung führt. So resultiert aus der Erhöhung der Standmenge von 4.000 auf 5.000 nur noch eine Reduzierung der Terminabweichung um 0,06 %. Grund hierfür ist, dass die Terminabweichung hauptsächlich von anderen Einflussgrößen abhängt, nämlich Terminierungsverfahren oder Methode zur Reihenfolgenbildung.

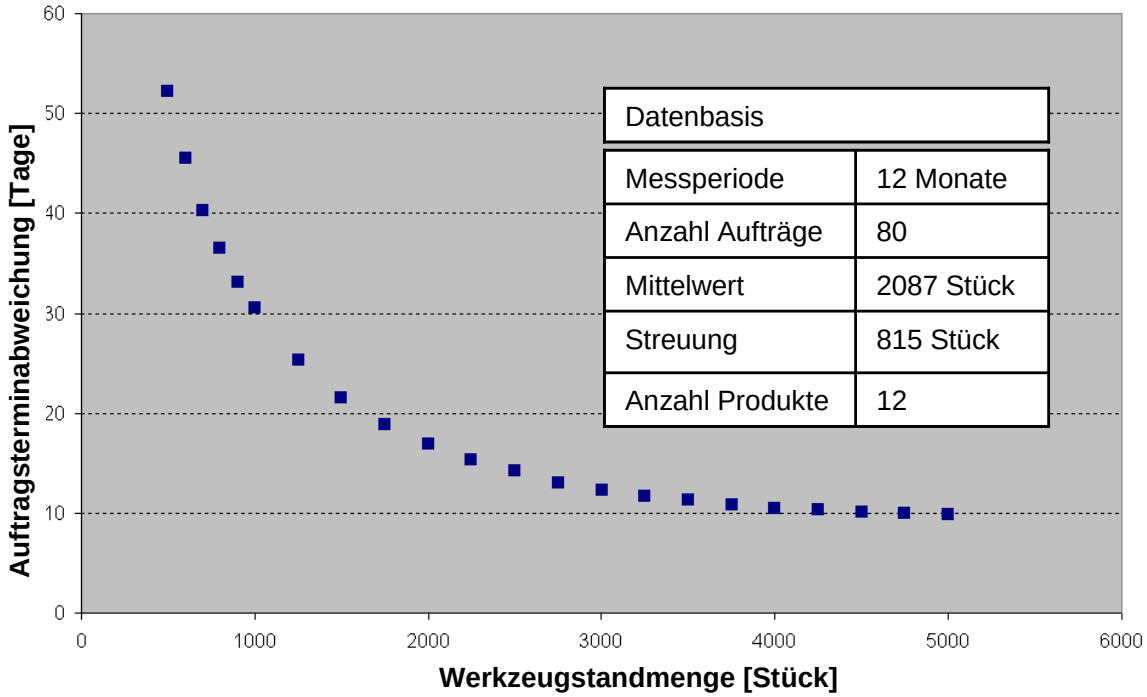


Bild 5-10: Korrelation zwischen der mittleren Terminabweichung im Abgang und der Werkzeugstandmenge

Die letzte untersuchte Korrelation diente der Analyse der Zusammenhänge zwischen der Werkzeugstandmenge und dem mindestens erforderlichen Sicherheitsbestand im Fertigteillager, der stets eine Erfüllung des Liefertermins und der Liefermenge sicherstellt. Hierfür wurde die Ist-Zugangskurve nach jedem Simulationslauf der Kundennachfragekurve gegenübergestellt (Bild 5-11). Die Ist-Zugangskurve stellt die kumulierten Zugänge in das Fertigteillager dar. Die Kundennachfragekurve ergibt sich aus den Lieferbestellungen und zeigt die kumulierte Soll-Liefermenge. Die Differenz zwischen beiden kumulierten Mengen ergibt den Bestand im Ausgangs- bzw. Fertigteillager. Ist die Differenz negativ, heißt es, dass die Soll-Liefermenge kleiner ist als die Ist-Zugangsmenge. Dies bedeutet wiederum, dass es Fehlmengen gibt und dass die Lieferabrufe nicht termingerecht erfüllt werden können.

Bild 5-11 zeigt den Vergleich zwischen der Ist-Zugangskurve und der Kundennachfrage in den ersten 6 Monaten des Jahres 2005. Bei der Simulation wurde die Werkzeugstandmenge auf 5.000 Stück eingestellt. Die Ist-Zugangskurve verläuft fast immer oberhalb der Nachfragekurve. Die Kundenbestellungen konnten in den meisten Fällen termin- und mengengerecht geliefert werden, und es gab nur in wenigen Fällen eine Fehlmenge im Fertigteillager. In dieser Periode wurde 129-mal geliefert. 121 Lieferungen davon waren pünktlich, was zu einer Liefertreue von 93,79 % führte. Die Liefer-

treue wurde berechnet als Verhältnis der termin- und mengengerecht erfüllten Bestellungen zur Gesamtanzahl der Bestellungen.

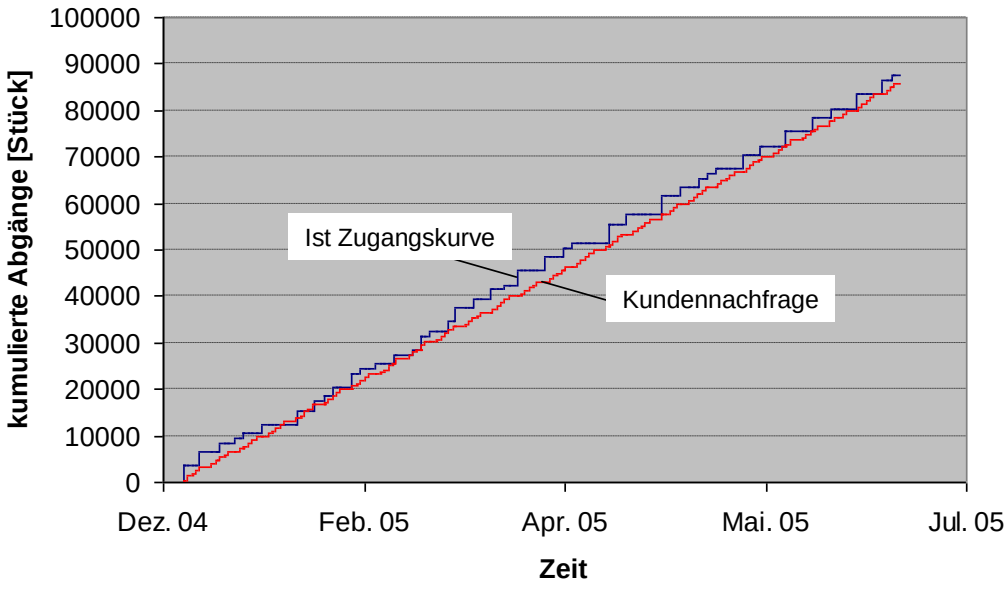


Bild 5-11: Vergleich zwischen Soll- und Ist-Abgangskurve am Beispiel einer Werkzeugstandmenge von 5.000 Stück

In 9 Fällen gab es eine Fehlmenge im Ausgangslager. Die höchste Fehlmenge betrug 2.989 Stück. Um die Fehlmenge im Ausgangslager auszugleichen, bedarf es eines Sicherheitsbestands an Fertigteilen. Die maximale absolute Fehlmenge ergibt den mindestens erforderlichen Sicherheitsbestand, um eine 100%ige Liefertermin- und -mengentreue zu erreichen. Die Korrelation zwischen diesem Sicherheitsbestandswert und der Werkzeugstandmenge wird in Bild 5-12 dargestellt.

In diesem Korrelationsdiagramm ist zwischen zwei Bereichen zu unterscheiden. Für Werte der Werkzeugstandmenge unter 2.000 Stück ist eine „schwache“ lineare Korrelation zu erkennen. Mit steigendem Wert der Standmenge sinkt der mindestens erforderliche Sicherheitsbestand. Weil eine Erhöhung der Werkzeugstandmenge zu einem geringeren Umrüstaufwand führt, werden die Fertigungsaufträge schneller abgefertigt, und die Fertigprodukte werden schneller im Ausgangslager verfügbar.

Der zweite Bereich des Diagramms zeigt dagegen keinen deutlichen Zusammenhang zwischen beiden Größen. Für Werte der Werkzeugstandmenge zwischen 2.000 und 5.000 Stück ist kein kontinuierlicher Trend des Sicherheitsbestands erkennbar. Stattdessen pendeln die Sicherheitsbestandswerte um 3.701 mit einer Streuung von 1.204 Stück.

Aus dieser Korrelationsanalyse lässt sich ableiten, dass die Werkzeugstandmenge nur bei niedrigen Werten einen relevanten Einfluss auf den mindesterforderlichen Sicherheitsbestand hat. Bei niedrigen Werkzeugstandmengen müssen die Anlagen häufig umgerüstet werden. Somit wird das Verhältnis der Rüst- zur Bearbeitungszeit hoch,

was sich negativ auf die Leistung auswirkt. Um trotz niedriger Leistung lieferfähig zu sein, müssen entsprechend hohe Sicherheitsbestände im Lager gehalten werden.

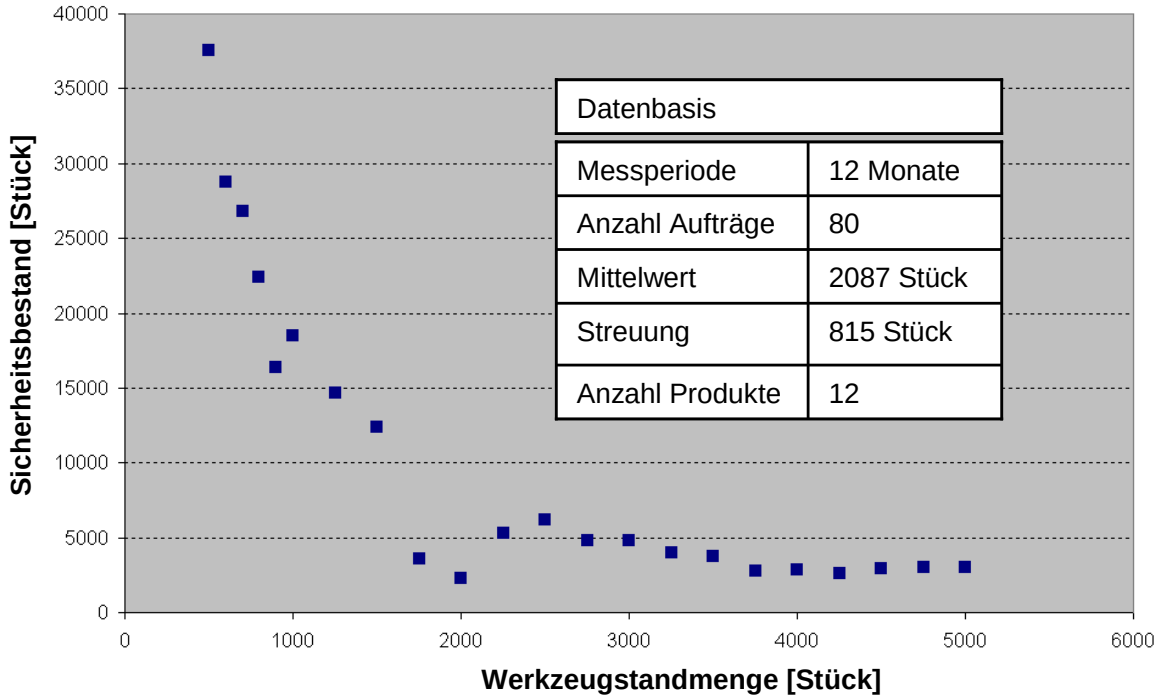


Bild 5-12: Korrelation zwischen dem mindestens erforderlichen Sicherheitsbestand im Abgangslager und der Werkzeugstandmenge

Bei hohen Werten der Werkzeugstandmenge wird dagegen das Verhältnis der Rüst- zur Bearbeitungszeit so klein, dass die Einflüsse der Rüstzeit auf die Leistung des Arbeitssystems vernachlässigbar werden. Deshalb steht kein relevanter Zusammenhang zwischen der Werkzeugstandmenge und des erforderlichen Sicherheitsbestands.

5.1.3 Ableitung einer Zusammenhangmatrix

Die in Abschnitt 5.1 identifizierten Zusammenhänge zwischen den technologischen und logistischen Parametern werden in Bild 5-13 vorerst zusammengefasst.

Es wird dabei zwischen den folgenden drei Arten eines Zusammenhangs unterschieden:

- Eine direkte Abhängigkeit des logistischen vom technischen Parameter, die aus einer mathematischen Untersuchung abgeleitet wird. Dieser Zusammenhang wird als voller Kreis in der Matrix dargestellt.
- Eine indirekte Abhängigkeit, die basierend auf der Korrelationsanalyse identifiziert wird. Dieser Zusammenhang wird als weißer Kreis gezeigt.
- Der logistische Parameter hängt nicht vom technologischen Parameter ab.

Die Werkzeugstandmenge beeinflusst in erster Linie den Einstellparameter zur Modellierung des Werkzeugausfalls. Dieser Parameter ist relevant bei der Feinsteuerung (vgl.

5.1). Von der Werkzeugstandmenge hängen darüber hinaus die Rüst- und Herstellkosten ab, die bei der Berechnung der wirtschaftlichen Fertigungslosgröße berücksichtigt werden. Wird die Losgröße nicht berechnet, sondern basierend auf Erfahrungswissen des Planers eingestellt, so kann sie ebenso von der Standmenge der Werkzeuge abhängen. Letztere kann nämlich als obere Grenze der Fertigungslösgröße im System eingestellt werden.

Logistische Parameter	Technologische Parameter					
	WSM	Te	Tr	AR	Ttech	Vtech
Planungsfrequenz						
Planungshorizont						
Planungsvorlauf						
Strategie der Bedarfsermittlung						
Sicherheitsbestand im Warenausgangslager	○			●		
Verfahren/ Methode						
Maschinenstörungen						●
Personal-/ Werkzeugausfall	●					
Prioritätsregeln			●			
Bestellpolitik						
Wiederbeschaffungszeit	●		●		●	
Sicherheitsbestand im Wareneingangslager	○					
Primärbedarf				●		
Fertigungslosgröße	●	●	●		●	
Mittlere Durchlaufzeiten	○	●	●	●	●	●
Mittlere Übergangszeiten					●	
Mittlere Auftragsdurchlaufzeiten	○	●	●	●	●	●
Maximale Kapazität	○	●	●	○		●
Bedarfsmenge				●		
Rüstkosten	●		●			
Lagerhaltungskostensatz						
Periodenlänge						
Lagerkostenprozentsatz						
Materialkosten						
Herstellkosten	●	●	●	●	●	

● direkte Abhängigkeit der logistischen von den technologischen Parametern
○ indirekte Abhänikeit der Parameter voneinander (abgeleitet aus der Korrelationsanalyse)

WSM	Standmenge der Werkzeuge [-]	AR	Ausschussrate [%]
Te	Bearbeitungszeit [min]	Ttech	technisch bedingte Wartezeit [min]
Tr	Rüstzeit [min]	Vtech	technische Verfügbarkeit der Anlagen

Bild 5-13: Zusammenhang zwischen technologischen und logistischen Parametern einer Schmiede-Prozesskette

Die Korrelationsanalyse hat des Weiteren gezeigt, dass sich die Werkzeugstandmenge in bestimmten Wertebereichen auf die mittlere Durchlauf- sowie Auftragsdurchlaufzeit auswirken kann. Ebenso wirkt sie sich auf den erforderlichen Sicherheitsbestand im Warenausgangslager aus, um die gezielte Liefertermin- und -mengentreue zu gewährleisten.

Die Bearbeitungszeit T_e, die in erster Linie von der Technologie abhängt, wirkt sich entscheidend auf die Parameter „mittlere Durchlaufzeit“ und „mittlere Auftragsdurchlauf-

zeit“ aus. Wird die wirtschaftliche Fertigungslosgröße berechnet, so hängt diese auch von der Bearbeitungszeit ab. Ferner besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Bearbeitungszeit und den Herstellkosten. Mit steigender Bearbeitungszeit werden die Herstellkosten proportional höher.

Ähnlich wie bei der Bearbeitungszeit beeinflusst die Rüstzeit T_r direkt die logistischen Parameter „mittlere Durchlaufzeit“ und „mittlere Auftragsdurchlaufzeit“. Sie wirkt sich ebenso auf die Rüst- und somit Herstellkosten aus. Weil die Rüst- und Herstellkosten bei der Berechnung der wirtschaftlichen Fertigungslosgröße relevant sind, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Rüstzeit und der Fertigungslosgröße. Die Bearbeitungszeit kann sich darüber hinaus auf die Prioritätsregeln bei der Reihenfolgeplanung auswirken, wenn die im Vorfeld ausgewählte Methode zur Reihenfolgeplanung nach einer Minimierung der Rüstzeiten strebt.

Eine Produktion von Ausschuss resultiert in einer Verlängerung der Durchlauf- und Auftragsdurchlaufzeit (vgl. 5.1.1.2). Ferner erhöht sich der Primärbedarf kontinuierlich mit einer steigenden Überproduktion, die wegen der produzierten Ausschussmengen verursacht wird. Der bei der Absatzplanung errechnete Netto-Primärbedarf berücksichtigt i. d. R. keine Ausschussmengen, die an den verschiedenen Prozesselementen produziert werden. Damit am Ende der Prozesskette die Netto-Bedarfsmenge erreicht wird, muss am Anfang die Gesamtmenge PM_{ges} aus Gleichung (10) in die Produktion eingelastet werden.

$$PM_{ges} = \frac{PB_{netto}}{\prod_{i=1}^{n}\left(100\% - AR_i\right)} \tag{10}$$

mit

PM_{ges}	zu produzierende Gesamtmenge (tatsächlicher Netto-Primärbedarf) [ME]
PB_{netto}	errechnete Netto-Primärbedarf [ME]
AR_i	Ausschussrate [0; 100 %] des Prozesselements i
n	Anzahl der Prozesselemente in der Kette [-]
i	Index Prozesselement i

Wird die erwartete Ausschussmenge bei der Berechnung des Netto-Primärbedarfs nicht berücksichtigt, so muss der Sicherheitsbestand an Fertigprodukten angepasst werden, um trotz Ausschussproduktion liefern zu können. Daher besteht ein Zusammenhang zwischen den Parametern „Ausschussrate“ und „Sicherheitsbestand im Warenausgangslager“. Die Anpassung des Sicherheitsbestands kann nur kurzfristig die Kompensierung des Ausschusses unterstützen. Mittel- bis langfristig wird eine Reduzierung der Ausschussrate erforderlich. Nicht zuletzt resultiert eine erhöhte Ausschussrate in steigenden Herstellkosten.

Die technisch bedingte Wartezeit eines Prozesselements wirkt sich hauptsächlich auf die Zeitkomponente „Warten nach Bearbeitung“ aus, die einen direkten Einfluss auf die logistischen Parameter „mittlere Übergangszeit“, „mittlere Durchlaufzeit“ sowie „mittlere Auftragsdurchlaufzeit“ hat. Wird darüber hinaus die Fertigungslosgröße nach einem der

gängigen Berechnungsverfahren wie z. B. der durchlauforientierten Losgrößenrechnung ermittelt [NYH91], so kann die Fertigungslosgröße von der Übergangszeit abhängen. Daraus wird ein Zusammenhang zwischen der technisch bedingten Wartezeit und der wirtschaftlichen Fertigungslosgröße abgeleitet. Abschließend wirkt sich dieser technische Parameter auf die Herstellkosten aus, die mit steigender Übergangszeit kontinuierlich steigen.

Die technische Verfügbarkeit einer Anlage beeinflusst in erster Linie den Einstellparameter „Maschinenstörung“, der wiederum eine direkte Auswirkung auf die maximale Kapazität der Anlage und somit das daraus resultierende Arbeitssystem hat. Ferner verlängern sich die Durchlauf- und Auftragsdurchlaufzeiten mit fallender technischer Verfügbarkeit der Anlagen.

5.2 Zusammenhänge zwischen neuen Technologien und den Parametern zur Gestaltung der Prozesskette

Vor der Einführung einer neuen Technologie sind deren Auswirkungen auf die Gestaltung der daraus resultierenden Prozesskette zu untersuchen. Dies beinhaltet die Strukturierung sowie Dimensionierung der Abläufe.

Heutzutage werden kontinuierlich innovativere Technologien angestrebt, um die Wettbewerbsdimensionen *Zeit*, *Qualität* und *Kosten* zu verbessern.

Eine neue Technologie trägt zum Erfolgsfaktor *Zeit* dadurch bei, dass die Prozesszeiten immer kürzer werden. Die Prozesszeiten betreffen zum einen die Bearbeitungszeiten, die z. B. durch höhere Geschwindigkeiten bei spanenden Maschinen oder kürzere Taktzeiten bei umformenden Anlagen reduziert werden können. Zum anderen betreffen sie die technisch bedingten Prozesszeiten wie z. B. die Trockenzeit nach dem Lackieren oder die Abkühlzeit nach dem Schmieden. Die Lieferzeit wird ebenfalls von der Rüstzeit beeinflusst. Das kontinuierliche Anstreben der Verkürzung der Rüstzeit soll immer ein Bestandteil der Technologieentwicklung sein.

Um eine bessere *Qualität* der Bauteile zu erreichen, sind Technologien gefragt, mit denen Teile genauer gefertigt werden können. Die Genauigkeit der Werkzeuge sowie die Einstellung der technischen Parameter wie z. B. Geschwindigkeit oder Temperatur sind hierfür maßgebend. Um die Technologiegenauigkeit zu quantifizieren, sind die Prozessfähigkeitsindices C_m und C_{mk} sowie die Ausschussrate zu messen und auszuwerten.

Die Technologie ist abschließend als *wirtschaftlich* anzusehen, wenn die Entwicklungs- und Implementierungskosten einen vordefinierten Rahmen nicht überspringen. Des Weiteren wirkt sich die technische Verfügbarkeit der aus der neuen Technologie resultierenden Anlagen auf die Wirtschaftlichkeit aus. Die Anlagen müssen technisch hoch verfügbar sein, um eine optimale Nutzung sicherzustellen.

Die Frage, die sich nun stellt, lautet: Welche Auswirkungen haben diese technologiebezogenen Merkmale auf die logistische Gestaltung der resultierenden Prozesskette?

Die zeitbezogenen technologischen Merkmale *Prozess-* und *Rüstzeiten* verhalten sich proportional zu den logistischen Parametern Durchlauf- und Auftragsdurchlaufzeit (vgl.

5.1.1.1). Die gleichen Parameter wirken ebenfalls auf die Einstellgrößen zur Gestaltung der resultierenden Prozesskette.

Eine Erhöhung der Geschwindigkeit einer Maschine wie z. B. Vorschub- oder Drehgeschwindigkeit verhält sich umgekehrt proportional zur Bearbeitungszeit, die kontinuierlich mit steigender Fertigungsgeschwindigkeit sinkt. Entsprechend der Bearbeitungszeitverkürzung müssen die Takte des betrachteten Arbeitssystems mit den Takten der vorgelagerten sowie nachgelagerten Arbeitssysteme harmonisiert werden, was eine logistische Herausforderung darstellt. Dies geschieht entweder durch technische Maßnahmen oder durch Anpassung der Maschinenanzahl. Soll die Maschinenanzahl konstant bleiben, so müssen einzelne Arbeitszeitmodelle erarbeitet werden, damit das aus der neuen Technologie resultierende Arbeitssystem die gleiche mittlere Ausbringung wie das vor- sowie nachgelagerte Arbeitssystem hat. Anschließend muss die Verkettung zwischen den einzelnen Arbeitssystemen elastisch gestaltet werden und die Kapazität des Zwischenpuffers muss neu dimensioniert werden.

Eine neue Technologie kann darüber hinaus *technische Besonderheiten* haben, die eine Restrukturierung der gesamten Prozesskette erzwingen. Eine technisch bedingte Wartezeit nach dem Bearbeiten ist ein Beispiel. Dies kann z. B. auftreten, wenn das Kaltschmieden (Formgebung bei Raumtemperatur) durch das Halbwarmschmieden ersetzt wird. Um die Umformbarkeit der Bauteile bei gleichzeitiger Reduzierung der Schmiedekraft gegenüber dem Kaltschmieden zu erhöhen, bietet sich die Ablösung dieses Verfahrens durch das Halbwarmschmieden an. In diesem Fall müssen die geschmiedeten Teile nach dem Schmieden abgekühlt werden, bevor sie weiterbearbeitet werden. Diese Abkühlzeit entspricht einer technisch bedingten Wartezeit nach der Bearbeitung und erfordert eine Redimensionierung des Zwischenpuffers nach der Schmiedepresse.

In Abhängigkeit von der Genauigkeit einer neuen Technologie können darüber hinaus die Anzahl sowie Reihenfolge der Arbeitsvorgänge einer Prozesskette definiert werden. Eine neue Technologie kann zu einem Wegfall eines der nachgelagerten Prozesselemente führen bzw. weitere erfordern. Wird z. B. das Stanzen durch das Laserschneiden als Zuschnittverfahren ersetzt, so ist es möglich, auf das nachfolgende Prozesselement „Entgraten“ zu verzichten. Im umgekehrten Fall, d. h. das Laserschneiden wird bspw. wegen zu hoher Kosten oder zu langer Bearbeitungszeiten durch das Stanzen ersetzt, wird ein Prozessschritt zum Entgraten (z. B. Sandstrahlen oder Trowalisieren) erforderlich. Des Weiteren kann anhand der Kennzahlen C_m und C_{mk} die Prozessfähigkeit der neuen Technologie ausgewertet werden (vgl. 2.2.1). Je nach Prozessfähigkeit besteht die Möglichkeit, einige Prüfarbeitsvorgänge zu eliminieren.

Um ein besseres Verständnis dieser Zusammenhänge zu schaffen, werden diese anhand der Ablösung des konventionellen Gesenkschmiedens durch die innovative Technologie des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung erklärt.

Bild 5-14 zeigt die einzelnen Prozesselemente der konventionellen Schmiedeprozesskette sowie das Verbesserungspotenzial im Fall des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung. Im Mittelpunkt der Einführung des Präzisionsschmiedens steht neben der Materialersparnis und der Erreichung besserer Bauteilqualität die drastische Verkürzung der Prozesskette, die unter anderem dank der Integration der Wär-

mebehandlung in den Schmiedeprozess und der Substitution der spanenden Weichbearbeitung durch das Feinschleifen erreicht wird.

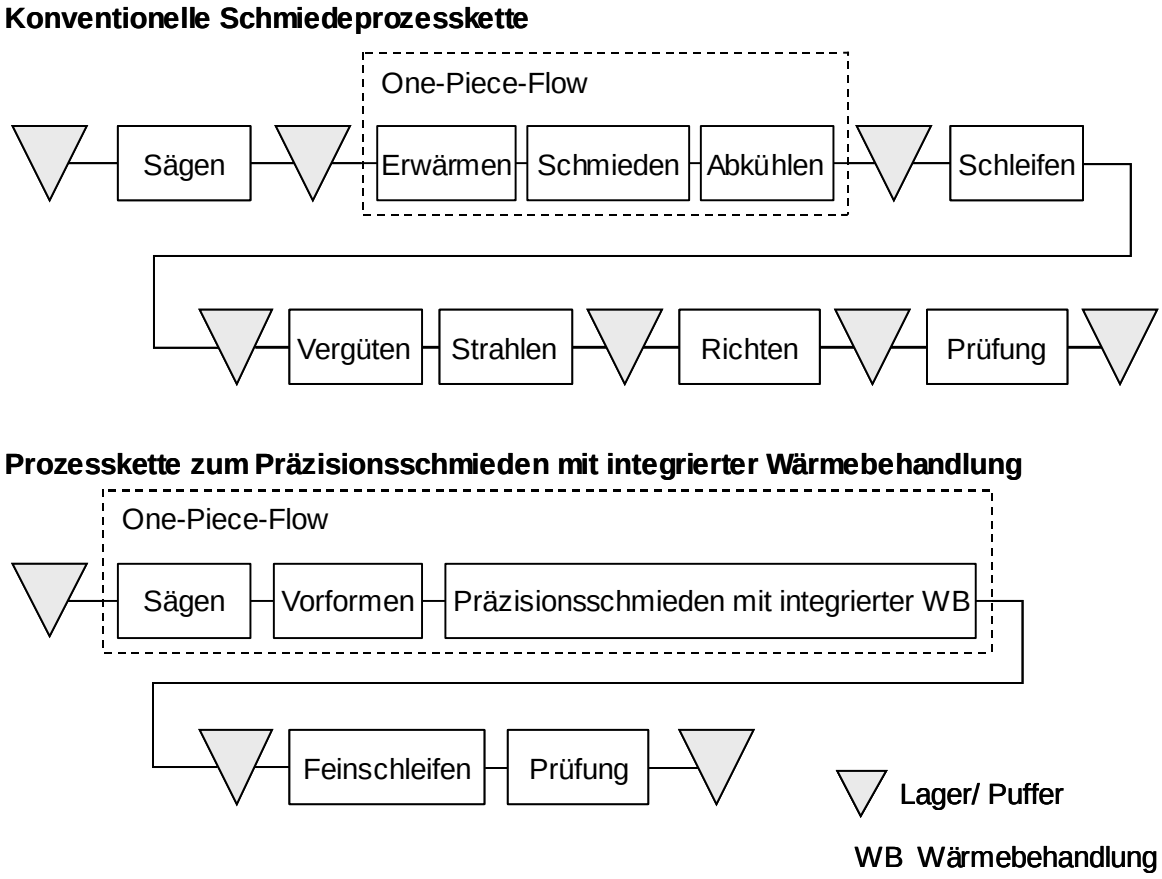


Bild 5-14: Vergleich Präzisionsschmieden mit der konventionellen Schmiedeprozesskette

Die neue Technologie zum Präzisionsschmieden beeinflusst das Layout der innerbetrieblichen Prozesskette. Sie erzwingt nämlich eine neue Anordnung der einzelnen Anlagen.

Dadurch, dass die integrierte Wärmebehandlung die Restwärme des Präzisionsschmiedens ausnutzt, müssen die entsprechenden Einrichtungen zur Wärmebehandlung der Schmiedepresse unmittelbar nachgeordnet sein. Deshalb ist der neue Platzbedarf für die Schmiedeanlage größer als der vorherige, der nur die herkömmliche Schmiedepresse umfasst.

Darüber hinaus ist mit dem Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung die technische Bedingung verknüpft, dass nach dem Bauteilhärten ein geregeltes Abkühlen stattfinden muss, um die vordefinierten Einhärtungstiefe und Grundhärte zu erreichen. Für diese abgestimmte Abkühlung, die von ca. 200 °C bis auf Raumtemperatur verläuft, muss daher ein Abkühlband vorgesehen werden. Dieses Band dient gleichzeitig als Zwischenpuffer zwischen der Wärmebehandlung und der anschließenden Qualitätsprüfung, dessen Größe in Funktion des Abkühlverlaufs und des Schmiedetakts ermittelt werden muss.

Eine weitere Neuerung dieser Technologie stellt der Wegfall der Weichbearbeitung sowie der klassischen Wärmebehandlung in Öfen dar. Deshalb ist eine Restrukturierung der dem Schmieden nachgelagerten Prozesselemente notwendig. Dieser Bereich zur Wärmebehandlung ist bei den meisten Schmiedeunternehmen durch das Fertigungsprinzip „Werkstattfertigung“ geprägt. Dadurch, dass dieser Bereich größtenteils wegfällt und nur die Prozesselemente zur Qualitätsprüfung erhalten bleiben, besteht die Möglichkeit der linearen Verkettung aller Prozesse. Es besteht darüber hinaus die Möglichkeit, alle Prozesselemente mit der Taktzeit des Präzisionsschmiedens abzustimmen und somit die ganze Prozesskette ohne große Zwischenpuffer zu verketten. Hierfür muss der Takt der langsameren Prozesselemente, wie z. B. der Qualitätsprüfung, durch eine redundante Bereitstellung von Anlagen verkürzt werden.

Zuletzt ist die Schulung und Weiterbildung der Anlagenbediener erforderlich. Sie müssen mit den neuen Technologien und den entsprechenden Anlagen umgehen können, aber vor allem auch mit neuen Fertigungsprinzipien. Weil die getaktete Linienfertigung störanfälliger als die Werkstattfertigung ist, müssen die Anlagenbediener lernen, schnell und effizient auf mögliche Störungen zu reagieren.

5.3 Ermittlung der logistischen Aufgaben zur Beherrschung der Technologieänderung

Zusätzlich zu den Zusammenhängen zwischen den technologischen und logistischen Parametern bestehen Abhängigkeiten zwischen den logistischen Aufgaben und den Tätigkeiten während der Technologieänderung. In diesem Abschnitt werden diese Aufgaben ermittelt. Hierfür werden zuerst die verschiedenen Phasen des Technologielebenszyklus aus logistischer Sicht beschrieben. Daraus werden anschließend die für die logistische Beherrschung der Technologieänderung erforderlichen Aufgaben abgeleitet.

5.3.1 Charakteristika der Phasen des Technologielebenszyklus

Die Zahl der Phasen im Lebenszyklus einer Technologie variiert in der Literatur zwischen drei und sechs. Darüber hinaus berücksichtigen einige Autoren die Zeitspanne vor der Markteinführung [HÖF92]. In diesem Abschnitt der Arbeit wird das S-Kurven-Modell erweitert und als Basis für die Beschreibung der Lebenszyklusphasen dienen.

Dieses Modell ist für die vorliegende Arbeit besonders geeignet, weil es die Ablösung einer konventionellen Technologie durch eine neue innovative Technologie darstellt. Die grafische Darstellung einer solchen Technologieänderung ist von besonderer Bedeutung, weil in der Übergangszeit zwischen der alten und neuen Technologie entscheidende Aufgaben entstehen, die zum Zwecke eines Markterfolgs zu bewältigen sind [WOL95]. Ein weiterer entscheidender Grund für diese Auswahl ist, dass die S-Kurve die Potenziale der neuen Technologie im Vergleich zur alten aufzeigt.

Die Erweiterung des Modells bezieht sich im Wesentlichen auf eine Unterteilung der Lebenszykluskurve in konkrete Phasen. Es werden fünf Phasen skizziert, wobei die Phase (0) die *Grundlagenforschung* darstellt und die weiteren vier Phasen die Be-

triebsphasen präsentieren (s. Bild 5-15). Die Betriebsphase ist in der Art definiert, dass die Technologie während dieser Phase verwirklicht und in Betrieb genommen wird.

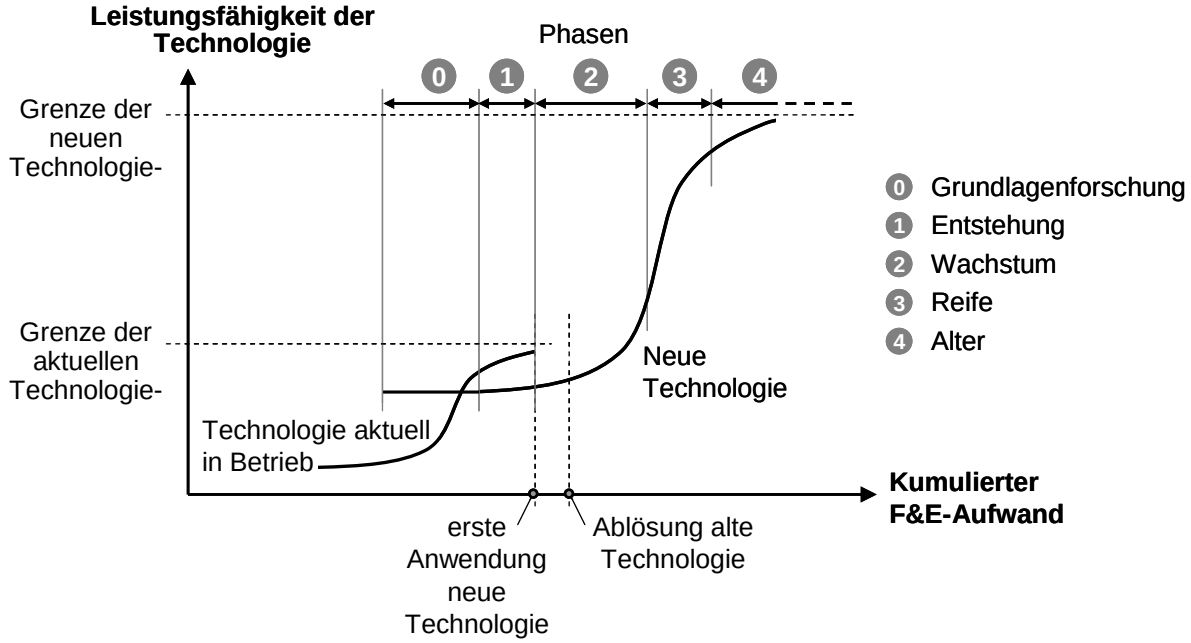


Bild 5-15: Erweitertes S-Kurven-Modell

Im Anschluss an die Phase Grundlagenforschung wird während der *Entstehungsphase* die Technologie zur ersten betrieblichen Anwendung „reif gemacht“. Die *Wachstumsphase* ist gekennzeichnet durch zwei Zeitpunkte: Sie beginnt mit der ersten betrieblichen Anwendung der neuen Technologie und beinhaltet den Zeitpunkt, zu dem die neue Technologie die alte komplett ablöst. Anschließend erfolgt die Reifephase, die durch die höchste Kurvensteigung charakterisiert ist. Als abschließende Phase erfolgt die Altersphase, in der sich auch die neue Technologie ihrer Leistungsgrenze nähert.

Die vier Betriebsphasen sind durch zahlreiche qualitative Faktoren charakterisiert. In der einschlägigen Literatur sind diese Faktoren meistens betriebswirtschaftlicher Art [GER04, HÖF92, SPU98]. In Tabelle 5-4 werden die für die Produktionslogistik relevanten Charakterisierungsindikatoren aufgelistet. Die Grundlagenforschungsphase wird an dieser Stelle sowie für den Rest dieser Arbeit nicht mehr betrachtet, weil in diesem frühen Stadium des Technologielebenszyklus eine logistische Betrachtung der zu entwickelnden Technologie noch nicht relevant ist. Erst wenn aus dieser Phase eine neue Technologie resultiert, deren logistische Eigenschaften abschätzbar sind und die verwirklicht und vermarktet werden soll, gewinnt die Logistik an Bedeutung.

Tabelle 5-4: Charakteristika der Phasen des Technologielebenszyklus

Entstehungsphase	Wachstumsphase	Reifephase	Altersphase
▪ Erhöhter Bedarf an Testläufen ▪ Suche nach geeigneten Parametern ▪ Komplexität ▪ Dynamik ▪ Fehlentwicklung ▪ Mehrfachentwicklung	▪ Fehlende Wissensbasis bzw. Erfahrung ▪ Unsicherheit bzw. Risiko ▪ Technische Auslegung (Standzeit der Werkzeuge, Ausschussquote usw.) mit weiterem Verbesserungspotenzial ▪ Auftragsgröße kontinuierlich steigend	▪ Stabilität der Prozesse ▪ Technische Beherrschung	▪ Annäherung an technische Leistungsgrenze

5.3.1.1 Logistische Charakteristika der Entstehungsphase

Nachdem die Grundlagen einer neuen Technologie erforscht worden sind, folgt die Entstehungsphase der Technologie. Während dieser Phase werden hauptsächlich die Inbetriebnahme und Erprobung der neuen Technologie angestrebt. Aus diesem Grunde ist ein erhöhter Bedarf an Testläufen für diese Phase kennzeichnend. Es werden zum einen die technischen Qualitätsaspekte der neuen Technologie erprobt und zum anderen die logistische Integration in die bestehenden logistischen Abläufe der abzulösenden Technologie untersucht. Dies resultiert in einer Neugestaltung der Prozesskette. Die Gestaltung der Prozesskette beinhaltet die Auslegung und die Dimensionierung der Prozesse. Anhand der logistischen Auslegung wird z. B. die Anzahl oder der Automatisierungsgrad der erforderlichen Anlagen ermittelt. Des Weiteren soll die Verkettung der durch die neue Technologie erforderlichen Anlagen mit der Prozesskette untersucht werden. Damit sind Verkettungsart und -grad gemeint.

Aufgabe der Dimensionierung ist es anschließend, die Puffergrößen zwischen den einzelnen Prozessen oder die Durchlaufzeiten zu bestimmen. Hierzu wird zunächst das Produktionsprogramm aus der Vergangenheit angenommen, evtl. ergänzt durch strategische Zukunftsszenarien. Dadurch wird ein Vergleich zwischen den Logikzielen der neuen und der alten Technologie ermöglicht. Aus diesen Testläufen werden relevante Erkenntnisse zur Anlagenauslegung gewonnen.

Der Bedarf an Testläufen wird darüber hinaus mit der Suche nach geeigneten Parametern begründet, wie z. B. der Temperatur beim Schmieden oder der Schnittgeschwindigkeit beim Zerspanen. An dieser Stelle werden zahlreiche Versuche mit unterschiedli-

chen Kombinationen dieser technischen Parameter durchgeführt, um zum einen die Qualität der Erzeugnisse zu bestimmen und zum anderen die Einflüsse dieser Parameter auf die logistische Dimensionierung zu identifizieren. Eine Erhöhung der Anlagengeschwindigkeit führt z. B. zu einer Reduzierung der Bearbeitungszeit an der entsprechenden Anlage. Können die der neuen Technologie nachgelagerten Prozessschritte diese Ausbringungsrate nicht schaffen, so ist eine Zwischenpufferung der Erzeugnisse zwischen den beiden Prozessschritten zwingend erforderlich. Deshalb sind eine Neudimensionierung des Zwischenpuffers und eine Neubestimmung der Durchlaufzeit unerlässlich. Auch hierfür werden die aus der Vergangenheit vorhandenen Aufträge für die Anlagenauslegung verwendet.

Die Entstehungsphase ist außerdem durch eine hohe Komplexität und Dynamik gekennzeichnet. Dadurch, dass unterschiedliche Parameterkombinationen möglich sind, die wiederum in unterschiedlichen Wechselwirkungen mit den logistischen Parametern der Prozesse stehen, entsteht eine Reihe von möglichen Varianten zur technischen und logistischen Auslegung der Prozesse und Abläufe.

Diese Komplexität und Dynamik verursacht oft Fehl- bzw. Mehrfachentwicklungen. Die unstrukturierte Suche nach geeigneten Parametern führt iterativ zu einer Anpassung und somit zur Mehrfachentwicklung der neuen Technologie. Es ist dabei nicht auszuschließen, dass die neue Technologie aufgegeben wird, falls ihre Integration in die vorhandenen Prozesse aus logistischer Sicht scheitern sollte. Dieser Fall könnte auftreten, wenn z. B. die neue Technologie wegen zu langer Prozesszeiten die jährlich vorgeschriebene Ausbringung nicht leistet.

5.3.1.2 Logistische Charakteristika der Wachstumsphase

Während der Wachstumsphase werden die ersten Teile mit der neuen Technologie gefertigt. Bis zum Zeitpunkt der vollständigen Ablösung der alten Technologie wird die Auslastung der neuen Anlagen schrittweise erhöht. Im Allgemeinen fehlt Unternehmen in dieser Phase die Erfahrung und die entsprechende Wissensbasis über die Auslastungsgrenzwerte der neuen Arbeitssysteme. Es ist daher sehr wichtig, in dieser frühen Phase des Technologiehochlaufs sämtliche Abläufe, die als Basis für die spätere Planung und Steuerung dienen sollen, zu dokumentieren [WIN07].

Bedingt durch die fehlende Praxis ist diese Phase des Weiteren durch eine Unsicherheit der logistischen Abläufe gekennzeichnet, die durchaus zu Ausfall- und somit zu Versorgungsrisiken führen kann. Ein Ausfallrisiko bezeichnet einen unerwarteten Ausfall der neuen Anlagen, der wiederum zu einer mangelnden Ausbringung und somit zu einem Versorgungs- bzw. Lieferungsrisiko führen kann.

In der Regel erreicht die neue Technologie in dieser frühen Phase des Lebenszyklus die technischen Anforderungen, die an die alte Technologie bisher gestellt worden sind, noch nicht. Dies betrifft z. B. Ausschussquoten und Standzeiten der Werkzeuge. Die neue Technologie weist ein offenes, hohes technisches Potenzial auf, das erst in den späteren Phasen des Lebenszyklus erschlossen wird.

Ein weiteres Charakteristikum dieser Phase ist die kontinuierliche Steigerung der Auftragsmengen. Dadurch, dass die Auslastung der neuen Anlagen schrittweise erfolgt,

wächst die Auftragsgröße kontinuierlich zwischen den Zeitpunkten der ersten Anwendung und der kompletten Ablösung der konventionellen Technologie. Die alten Anlagen werden dementsprechend zurück gefahren.

5.3.1.3 Logistische Charakteristika der Reife- und Altersphase

Während der Reifephase erreichen die Prozesse einen hohen Grad an Stabilität. Die Abläufe werden technisch sowie logistisch beherrscht. In der abschließenden Altersphase nähert sich die Technologieleistung den technischen Grenzwerten. Das in den früheren Phasen des Lebenszyklus noch offene Potenzial wird ausgeschöpft.

5.3.2 Logistische Aufgaben entlang des Technologielebenszyklus

Die entlang des Technologielebenszyklus durchzuführenden logistischen Aufgaben resultieren aus der Einführung einer neuen Technologie (mit Betonung auf *Einführung*), aus den oben beschriebenen Charakteristika der verschiedenen Lebenszyklusphasen sowie aus der neuen Technologie an sich.

In Bild 5-16 sind die relevanten logistischen Aufgaben dargestellt, die infolge der *Einführung* einer neuen Technologie existieren.

<table>
<tr><th>Entstehung</th><th>Wachstum</th><th>Reife</th><th>Alter</th></tr>
<tr><td rowspan="3">▪ Gestaltung der von Technologie-änderungen der betroffenen Prozesse</td><td>▪ Anlauf-management neuer Technologie
▪ Multiprojekt-management
▪ Auslauf-management alter Technologie</td><td>▪ Produktions-management</td><td>▪ Auslauf-management</td></tr>
<tr><td colspan="3">▪ Beherrschung der Logistikkosten</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

Bild 5-16: Logistische Aufgaben infolge der Einführung einer neuen Technologie

Diese Aufgaben sind sogenannte Standardaufgaben, die unabhängig von den Merkmalen der neuen Technologie in allen Fällen durchgeführt werden müssen.

Während der Entstehungsphase ist es aus logistischer Sicht unerlässlich, die durch die neue Technologie erforderlichen Anlagen auf Kompatibilität mit den vorhandenen Prozessen zu überprüfen. Mit Kompatibilität ist dabei die logistische Integration bzw. Verkettung der neuen Technologie mit den weiteren Prozesselementen gemeint. Ein geeignetes Instrument hierfür ist die Materialflusssimulation. Durch das Simulieren der resultierenden Prozesse und die Auswertung der erreichten Logistikleistung kann identifiziert werden, wie sich die resultierende Prozesskette aus logistischer Sicht verhält.

Parallel zur Wachstumsphase der neuen Technologie durchläuft die alte Technologie ihre Altersphase. Deshalb sind in dieser Phase die Auslaufprozesse der alten sowie die Anlaufprozesse der neuen Technologie zu planen und steuern. Am besten sollten beide Prozesse parallel im Sinne eines Multiprojektmanagements durchgeführt werden, weil es durchaus möglich ist, dass sowohl der Anlauf der neuen Technologie als auch der Auslauf der alten Technologie die gleichen Ressourcen benötigt. Mit Ressourcen werden Arbeitssysteme und Personal bezeichnet.

In der Reifephase erreichen die Prozesse einen hohen Stabilitätsgrad und werden technisch beherrscht. Um die Prozesse zusätzlich logistisch zu beherrschen, sind Aufgaben des Produktionsmanagements durchzuführen. Das Produktionsmanagement umfasst hauptsächlich die Produktionsplanung und -steuerung sowie das logistische Monitoring und Controlling.

Abschließend sind die Auslaufprozesse in der Altersphase zu planen und zu steuern. Die Technologie stößt an ihre technische Grenze und wird durch eine neue Technologie abgelöst.

Eine logistische Aufgabe, die weiter an Bedeutung gewinnt, ist die Beherrschung der Logistikkosten. Nach Wildemann [WIL04a] betragen die Logistikkosten durchschnittlich 8,5 % vom gesamten Umsatz eines Unternehmens. Es ist daher zwingend erforderlich, diese Kosten kontinuierlich zu kontrollieren und schrittweise durch gezielte logistische Maßnahmen zu reduzieren. Diese Aufgabe ist in allen drei Phasen nach der Technologieeinführung durchzuführen.

Für die Durchführung dieser logistischen Aufgaben stehen zahlreiche Ansätze, Methoden und Werkzeuge zur Verfügung. Diese Aufgaben sind jedoch nicht spezifisch für eine neu einzuführende Technologie. Deshalb werden diese im Rahmen dieser Arbeit nicht fokussiert. Es wird stattdessen auf die Literatur von Wiendahl [WIE91, WIE97, WIE02c], Spath [SPA03], Risse [RIS02, RIS03] und Aurich [AUR04, AUR05] verwiesen.

Zusätzlich zu diesen Standardaufgaben lassen sich weitere logistische Aufgaben aus den Charakteristika des Technologielebenszyklus ableiten. Bild 5-17 stellt diese Aufgaben zusammen.

Die abgeleiteten logistischen Aufgaben sind den zwei Phasen der Entstehung und des Wachstums zugeordnet. Während der späteren Phasen des Technologielebenszyklus erreicht die Technologie einen hohen Reifegrad und kann sowohl technisch als auch logistisch beherrscht werden. In diesen Phasen werden die oben beschriebenen Standardaufgaben durchgeführt.

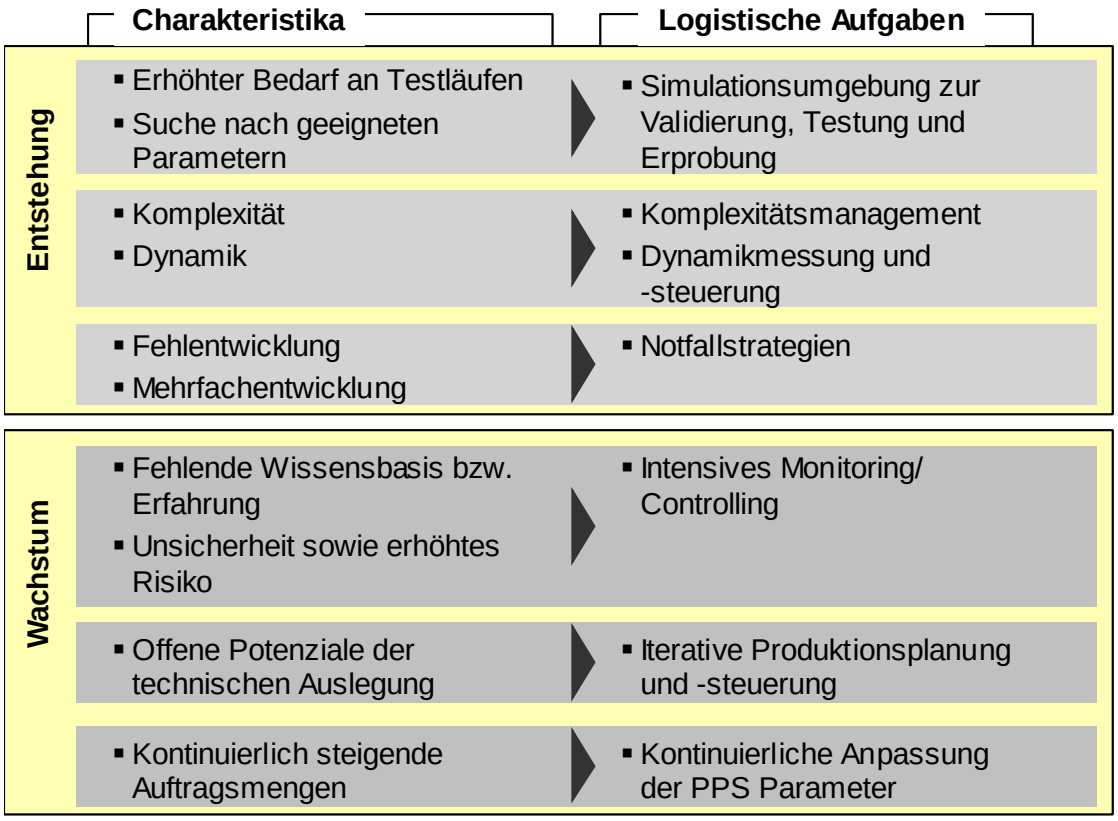


Bild 5-17: Abgeleitete logistische Aufgaben aus dem Technologielebenszyklus

Im Gegensatz dazu ergeben sich aus den Charakteristika der früheren Phasen zahlreiche logistische Aufgaben, die für die logistische Beherrschung der neuen Technologie von entscheidender Relevanz sind. Diese Aufgaben werden im Folgenden detaillierter beschrieben.

5.3.2.1 Aufgaben in der Entstehungsphase

Der erhöhte Bedarf an Testläufen und die Suche nach den geeigneten Parametern resultieren in einer logistischen Modellierung und Simulation der neuen Technologie sowie ihrer Wechselwirkungen mit den bestehenden Prozessen. Ein Simulationsmodell ist daher zum Zwecke der Validierung der möglichen Gestaltungsszenarien und der nach Einführung der neuen Technologie entstandenen Prozesskette nützlich. Hierfür soll es mindestens die Abstraktionsebenen Arbeitssystem und Prozesskette abbilden. Sämtliche logistischen innerbetrieblichen Abläufe sollen mit der Materialflusssimulation modelliert werden, um zum einen deren logistische Gestaltung durchzuführen und zum anderen die Auswirkungen der Veränderung von technischen Parametern auf die Prozesskettendimensionierung zu quantifizieren.

Zur Bewältigung der Dynamik und Komplexität der früheren Lebenszyklusphasen sind Konzepte zur ganzheitlichen Erfassung, Planung und Regelung der Dynamik und Komplexität in Unternehmensprozessen erforderlich [ADA98, PUH99]. Die bestehende Literatur zum Komplexitätsmanagement weist auf zahlreiche Ansätze hin, die hauptsächlich regelkreisbasiert sind. Dabei werden im Wesentlichen die drei Hauptfunktionen

Komplexitätserfassung, -planung und -regelung beschrieben. Die Komplexitätserfassung dient der Aufnahme, Abbildung und Bewertung von Komplexitätssituationen in einem Unternehmen. Dabei sind sämtliche unternehmensinternen Prozesse sowie externe Schnittstellen zu Lieferanten und Kunden betroffen.

Die Komplexitätsplanung definiert aufbauend auf den Ergebnissen der Komplexitätserfassung sogenannte Komplexitätsziele und entwickelt geeignete Maßnahmen zum Zwecke der strategiegerechten Reduzierung bzw. Erhöhung der Komplexität sowie deren Beherrschung [PUH99]. Aufgabe der Komplexitätsregelung ist abschließend die Überprüfung der Realisierung der geplanten Komplexität und der Maßnahmen zu deren Beherrschung. Es existieren des Weiteren verschiedene prozessorientierte Beiträge zum Komplexitätsmanagement, wie z. B. das Prozessmanagement [FER96, OST96, SCH97a], das Total Quality Management [EVE97, PFE01], Kaizen oder das Reengineering [FÜS97, HAM97].

Nach Eversheim ist darüber hinaus die Gestaltung einer optimalen technischen Komplexität von entscheidender Bedeutung [EVE98]. Dabei handelt sich um die Komplexität sowohl von Produkten als auch von Anlagen und Produktionssystemen. Eine explizite Zuordnung eines Komplexitätsmanagement-Ansatzes zum Technologiemanagement fehlt jedoch. Weil eine neue Technologie das Produkt und die Produktionssysteme beeinflusst, ist ein umfassendes Modell zur Komplexitätsbeherrschung gefragt. Dieses kann aus einer Kombination von zwei oder mehr vorhandenen Ansätzen entstehen.

Ein weiterer Identifikationsfaktor der Entstehungsphase ist die Mehrfach- bzw. Fehlentwicklung. Um auf dieses Problem effizient zu reagieren, bedürfen Unternehmen verschiedener Notfallstrategien. Auch hierfür existieren zahlreiche Methoden und Ansätze wie z. B. die Szenariotechnik [ZIN00] oder das sogenannte Technologie-Roadmapping [MÖH05]. Das Technologie-Roadmapping stellt eine ideale Klammer zwischen zwei entscheidenden Aufgaben zum Erwerben, Bewahren, Schützen und Verwerten von Technologien dar. Die erste Aufgabe beinhaltet dabei das Streben nach einer Prognose der zeitlichen Entwicklung von Technologien einschließlich ihrer häufig heterogenen Verknüpfungen. Bei der zweiten Aufgabe handelt es sich um die Ableitung von Maßnahmen zur Erhaltung bzw. Verbesserung der technologischen Position eines Unternehmens.

5.3.2.2 Aufgaben in der Wachstumsphase

Die Wachstumsphase ist gekennzeichnet durch mangelnde Erfahrung mit den logistischen Auswirkungen der neuen Technologie. In diesem frühen Stadium des Lebenszyklus sind keine Vergangenheitsdaten vorhanden, die als Basis für die Parametrierung der Produktionsplanung und -steuerung verwendet werden können. Des Weiteren sind systematische Fehler bzw. Zielgrößenabweichungen noch nicht bekannt, die in den neu entstandenen logistischen Prozessen auftreten können. Deshalb ist die Durchführung eines intensiven logistischen Monitorings und Controllings von großem Vorteil. Das Ziel dabei ist es, die Abweichungen der logistischen Ziele zu erkennen, zu bewerten und zu steuern.

Eine weitere entscheidende Charakteristik der Wachstumsphase ist, dass die Technologie noch offene Verbesserungspotenziale hat. Zu diesen Potenzialen gehört z. B. die

Reduzierung der produzierten Ausschussquote durch genauere Einstellung der technischen Parameter oder die Erhöhung der Standzeiten von Werkzeugen durch den Einsatz besserer Werkstoffe. Diese technischen Parameter beeinflussen entscheidend die Parametrierung der Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Aus diesem Grunde ist eine iterative Methode der PPS-Anpassung zwingend erforderlich, die sämtliche relevanten PPS-Parameter (vgl. 5.1.3) ständig in Abhängigkeit vom Entwicklungsfortschritt der Technologie anpasst. Hierfür ist eine periodische Verdichtung der Vergangenheitsdaten, deren Auswertung sowie die Rückkopplung der Auswertungsergebnisse mit den Planungs- und Steuerungsmethoden gefragt.

In der Wachstumsphase, vor allem zwischen der Ersteinführung der neuen Technologie und der kompletten Ablösung der alten Technologie, erfolgt der Hochlauf schrittweise. Dies bedeutet, dass die mit der neuen Technologie produzierten Mengen kontinuierlich über die Zeit steigen. Dies resultiert in Fertigungsaufträgen mit stark unterschiedlichen Größen, was wiederum in unterschiedlichen Auftragsdurchlaufzeiten resultiert. In diesem Fall stößt eine konventionelle mittelwertbasierte Planung an ihre Grenzen [WIE06]. Damit die Produktionsplanung, vor allem die Terminierung der Fertigungsaufträge, bessere und genauere Pläne liefert, müssen die relevanten Parameter zur Produktionsplanung und -steuerung periodisch während der ganzen Hochlaufphase im PPS-System angepasst werden. Hierbei sind hauptsächlich die Ermittlung der wirtschaftlichen Fertigungslosgröße sowie die Errechnung der Plan-Auftragsdurchlaufzeit von der Auftragsgröße abhängig.

5.3.3 Auswirkungen der Technologie auf die Lieferkette

Zusätzlich zu den in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen Aufgaben führt eine neue Technologie zu weiteren logistischen Fragestellungen, die in den früheren Phasen des Technologielebenszyklus beantwortet werden sollen. Auch wenn diese Fragestellungen – verglichen mit den Aufgaben aus Bild 5-17 – keine Kernaufgaben präsentieren, müssen sie während der Implementierung einer neuen Technologie berücksichtigt werden.

Prinzipiell lassen sich diese logistischen Fragestellungen mit der folgenden Kernfrage zusammenfassen: Welchen Einfluss hat die neue Technologie auf die Lieferkette?

Schon während der frühen Phasen des Technologielebenszyklus sind die möglichen Auswirkungen der neuen Technologie auf die Lieferkette zu untersuchen. Auch wenn es um die Fertigung des gleichen Produkts wie bei der alten Technologie geht, ist eine Umgestaltung der Lieferkette durchaus möglich. Die Umgestaltungsmaßnahmen müssen in diesen frühen Phasen ermittelt werden, um den Technologienutzen aus logistischer Sicht zu bewerten. Verglichen mit einer konventionellen Rentabilitätsrechnung, die das Investitionsvolumen dem wirtschaftlichen Ertrag gegenüberstellt, wird in dieser Phase eine sogenannte logistische Rentabilität überprüft. Es ist zu ermitteln, ob die neue Technologie den logistischen Anforderungen gerecht wird. Neben der Errechnung der innerbetrieblichen logistischen Größen, wie z. B. der Auftragsdurchlaufzeit oder dem mittleren Bestand, wird die logistische Rentabilität anhand der erreichten Termintreue gegenüber den Kundenbestellungen gemessen. Hierzu werden die aus der neuen Technologie resultierenden Prozesse simuliert und deren logistische Ergebnisse ausgewertet.

Eine neue Technologie erfordert i.d.R. andere Betriebsmittel und Betriebshilfsmittel als die abgelöste Technologie. Wird z. B. das Stanzen durch das Fräsen oder Nibbeln als Trennverfahren abgelöst, so werden andere Emulsionen zum Abkühlen erforderlich.

Des Weiteren kann eine neue Technologie den Einsatz von alternativen Werkstoffen bzw. Rohmaterialien ermöglichen. Wird z. B. das MIG-Verfahren (Metall-Inertgas-schweißen) eingeführt, so wird es auch möglich, Nichteisen-Werkstoffe wie Aluminium oder Kupfer zu verbinden [RET03]. Dies setzt allerdings eine Änderung der Produktkonstruktion voraus. In diesen beiden Fällen ist zu überprüfen, ob die vorhandenen Betriebsmittel- bzw. Rohstofflieferanten die neuen Sekundär- (Rohstoffe) bzw. Tertiärbedarfe (Betriebsmittel) qualitäts-, termin- und mengengerecht bereitstellen können. Daraus resultieren verschiedene logistische Aufgaben zum Thema Lieferantenmanagement. Dabei geht es hauptsächlich um die Auswahl der am besten geeigneten Lieferanten sowie um den Abschluss von Rahmen- bzw. Lieferaufträgen. Vor dem Abschließen der Lieferaufträge müssen die Grenzwerte der möglichen Bestellmengen ermittelt werden. Anhand der Materialflusssimulation können verschiedene Bestellszenarien erarbeitet werden, die verschiedene Markttendenzen und -prognosen widerspiegeln. Es ist anschließend mit dem Lieferanten zu verhandeln, ob er der neuen Bestelldynamik gerecht werden kann. Deshalb bedürfen Unternehmen für diese Aufgabe eines Simulationsmodells, welches zusätzlich zu den innerbetrieblichen Prozessen die ganzheitliche Lieferkette unter Berücksichtigung möglicher Umfeldturbulenzen abbildet.

Darüber hinaus kann eine neue Technologie zu einer neuen Stückliste des zu produzierenden Produkts führen. Das Ablösen des Gießens durch das Schmieden kann in manchen Fällen zu mehr Einzelteilen und somit zur Änderung der Stückliste führen. Weil das Gesenkschmieden die hohe Geometriekomplexität der gegossenen Bauteile in manchen Fällen nicht erreichen kann, bedarf es einer Änderung der Bauteilkonstruktion, die durchaus mehrere Einzelteile betreffen kann. Diese Einzelteile müssen dann zu einer Baugruppe zusammengebaut werden, die dem ursprünglichen Bauteil entspricht. In diesem Fall ist eine Durchführung einer Make-or-buy-Analyse denkbar, um zu entscheiden, welche Einzelteile in der eigenen Fertigung zu produzieren bzw. fremdzubeschaffen sind. Im Fall einer Fremdvergabe einiger der Einzelteile ist vor allem die Lieferfähigkeit der Lieferanten zu untersuchen.

Einen weiteren Zusammenhang zwischen einer neuen Technologie und der Gestaltung der überbetrieblichen Lieferkette können die logistischen Ziele darstellen. Wenn die neue Technologie kürzere Bearbeitungszeiten als die abzulösende Technologie verspricht und somit zum Zwecke einer jährlichen Ausbringungserhöhung eingeführt wird, muss eine Neudimensionierung der Lieferkette stattfinden. Neben der Neudimensionierung der Eingangs- und Ausgangsbestände ist die Lieferfähigkeit der aktuellen Lieferanten bei der neu entstandenen Konstellation zu überprüfen. Des Weiteren ist es möglich, dass sich das Unternehmen für eine neue Beschaffungspolitik entscheidet, die für den erhöhten Sekundärbedarf besser geeignet ist.

Um die aufgeworfenen Fragen zu beantworten, wird im Folgenden ein methodischer Ansatz präsentiert.

6. Methoden zur logistischen Beherrschung einer Technologieänderung

In diesem Kapitel werden die Methoden entwickelt, die der Durchführung der relevanten logistischen Aufgaben (vgl. 5.3.2) während einer Technologieänderung dienen. Dabei werden hauptsächlich die Aufgaben behandelt, die für die logistische Beherrschung der aus der neuen Technologie resultierenden Produktionsprozesse entscheidend sind.

Während der Entstehungsphase bedarf es hauptsächlich einer unterstützenden Methode, welche die Auswirkungen der Technologieänderung auf die Erreichung der logistischen Ziele innerhalb der Prozess- sowie Lieferkette auswertet. Hierfür wird eine simulationsbasierte Vorgehensweise für die Gestaltung der Prozesskette infolge einer Technologieänderung erarbeitet (Abschnitt 6.1).

Nach der Einführung der neuen Technologie bedarf es zum einen eines Werkzeugs zum Monitoring und zum anderen einer Methode zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung (vgl. 5.3.2.2). Diese Methode soll, neben der kontinuierlichen Anpassung der logistischen Parameter, Anforderungen aus logistischer Sicht an die neue Technologie definieren können (Abschnitt 6.2).

6.1 Simulationsbasierte Gestaltung der Prozesskette infolge einer Technologieänderung

Die Methode zur simulationsbasierten Technologieänderung umfasst hauptsächlich die folgenden zwei Aufgaben, die auf der inner- sowie überbetrieblichen Abstraktionsebene Unterstützung leisten:

- (Um-)Gestaltung der innerbetrieblichen Prozesskette während der Ablösung der alten durch die neue Technologie: Strukturierung und Dimensionierung der neuen Prozesskette sowie Ermittlung des logistischen Potenzials der neuen Technologie.
- Erprobung der Nachhaltigkeit der aus der Technologieänderung resultierenden Prozesskette: Sicherstellung der logistischen Fähigkeit der neuen Prozesskette in unterschiedlichen Lieferkettenumgebungen.

Diese Kernaufgaben werden in den folgenden Arbeitsabschnitten detaillierter dargestellt.

6.1.1 Gestaltung der Prozesskette

Die erste Phase des Technologielebenszyklus endet mit der Auswahl der neuen Technologie. Diese neue Technologie hat unterschiedliche technologische Parameter, die durchaus mehrere denkbare Einstellwerte haben können. Dadurch entstehen mehrere *Prozesskettenvarianten* zum Abbilden der innerbetrieblichen Produktionsprozesse.

Mit Hilfe der Materialflusssimulation werden diese unterschiedlichen Varianten unter Berücksichtigung der logistischen Aspekte miteinander verglichen (Bild 6-1).

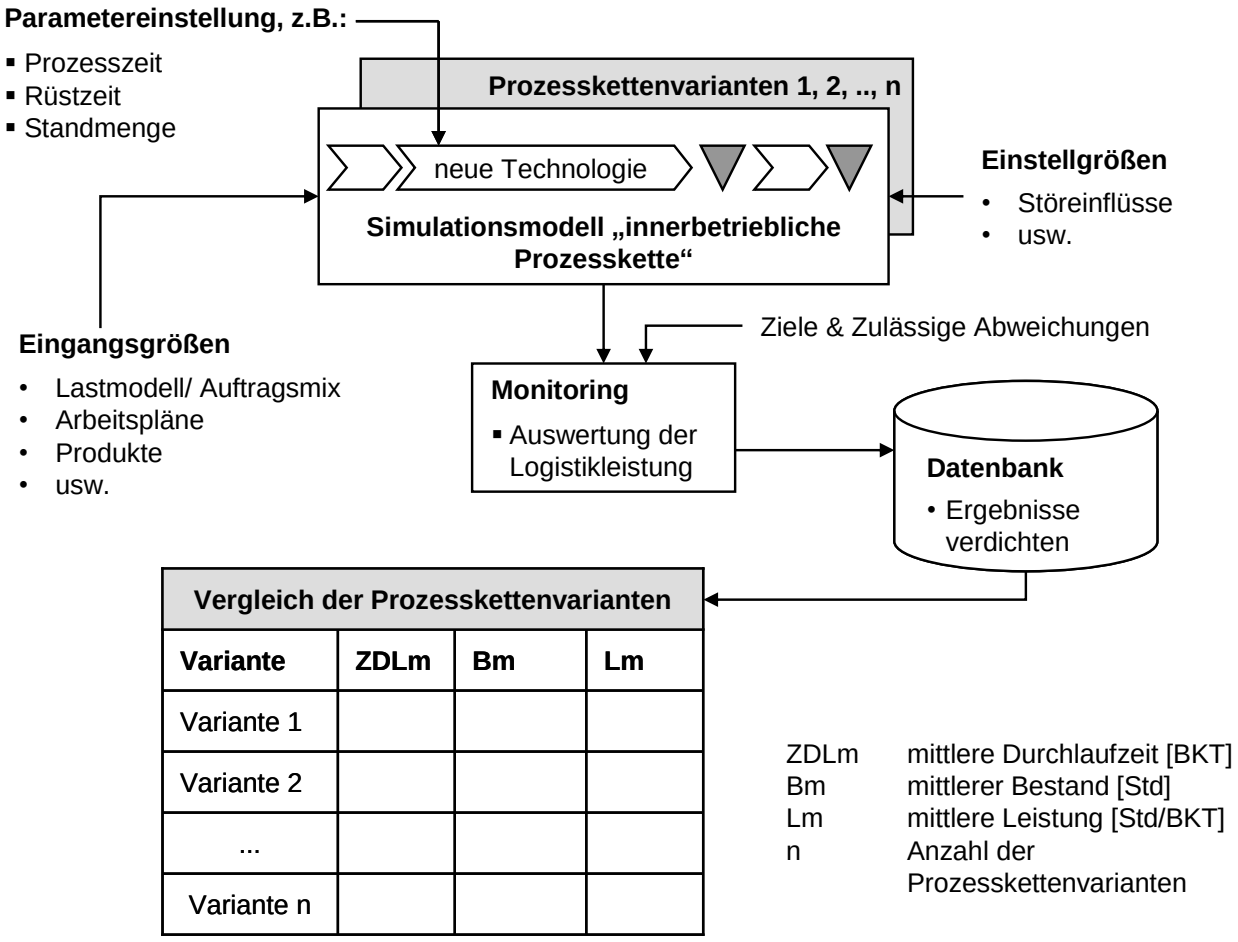


Bild 6-1: Logistische Auswertung von Technologien mit Hilfe der Materialflusssimulation

Zuerst wird die innerbetriebliche Prozesskette modelliert. Für den Ablauf der Materialflusssimulation werden die relevanten Eingangsgrößen, wie z.B. das Lastmodell und die Arbeitspläne eingestellt. Zusätzlich wird ein Modell zum Abbilden der Störgrößen ausgewählt. Das hierfür best geeignete Modell wird basierend auf Erfahrungswissen des Planers ausgesucht. In einem weiteren Schritt werden die Arbeitssysteme, die der neuen Technologie entsprechen, technologisch parametriert. Aus den unterschiedlichen Kombinationen der Parametereinstellwerte resultieren unterschiedliche Prozesskettenvarianten. Diese werden sukzessiv simuliert und hinsichtlich der Erreichung der logistischen Ziele *Durchlaufzeit*, *Bestand* und *Leistung* ausgewertet.

Gemäß einer vordefinierten Priorisierung der einzelnen logistischen Ziele wird abschließend die beste Prozesskettenvariante ausgewählt. Wegen der konkurrierenden Zusammenhänge zwischen der Leistung, Durchlaufzeit und des Bestands (vgl. 2.2.2), werden je nach Unternehmensstrategie die Logistikziele definiert. Der zentrale Kernpunkt dieser Zielsetzung ist die sogenannte logistische Positionierung. In diesem betrachteten Beispiel wird eine Positionierung zwischen einer hohen Leistung und einem niedrigen Bestandsniveau angestrebt.

Ferner unterstützt die Simulation die Neudimensionierung der Prozesskette, um eine Harmonisierung zwischen den neuen Technologieprozessen und den weiteren bereits vorhandenen Prozesselementen sicherzustellen. Bei der Prozesskettendimensionierung sind hauptsächlich die Parameter *Puffergrößen*, *Anzahl redundanter Anlagen* und *Prozesszeit* [SPI03; MEI05] einzustellen.

Für die Dimensionierung eines Puffers muss zuerst seine Kapazität im Simulationsmodell auf unendlich groß gesetzt werden. Nach dem Simulationslauf werden die Statistiken des Puffers ausgewertet [BAN08]. Die Statistiken des Puffers zeigen neben der Anzahl der Zu- und Abgänge den minimalen sowie maximalen Inhalt. Aus dem maximalen Inhalt kann die Pufferkapazität abgeleitet werden. Anschließend wird die Simulation neu gestartet, und die Pufferstatistik wird neu ausgewertet. Neben den bereits erwähnten Attributen zeigt die Statistik unterschiedliche Zeitanteile (Bild 6-2).

<table>
<tr><td colspan="4">Statistikerfassungszeit T_{stat}</td></tr>
<tr><td colspan="3">Ressource „nicht pausiert“</td><td>Ressource Pausiert
$T_{pausiert}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Ressource verfügbar</td><td colspan="2">Ressource nicht verfügbar</td></tr>
<tr><td>Wartezeit
$T_{wartend}$</td><td>Arbeitszeit
$T_{arbeitend}$</td><td>Blockiertzeit
$T_{blockiert}$</td><td>Störungszeit
$T_{gestört}$</td></tr>
</table>

Bild 6-2: Zeitmodell nach eM-Plant

Die relevante Größe für die Auswertung des Puffers ist die sogenannte relative Belegung, welche nach Gleichung (8) berechnet wird.

$$Bel_{rel} = \frac{T_{arbeitend} + T_{blockiert}}{T_{wartend} + T_{arbeitend} + T_{blockiert}} \tag{8}$$

mit

Bel_{rel} relative Belegung [%]
$T_{arbeitend}$ relativer Zeitanteil, an dem eine Ressource arbeitet [%]
$T_{blockiert}$ relativer Zeitanteil, an dem eine Ressource blockiert ist [%]
$T_{wartend}$ relativer Zeitanteil, an dem eine Ressource wartet [%]

Wird eine geringe relative Belegung gemessen, so heißt es, dass der Puffer überdimensioniert ist. Die Puffergröße wird iterativ so lange angepasst, bis die relative Belegung einen Wert nahe 100 % erreicht, und gleichzeitig die Blockier- und Wartezeit gegen 0% konvergiert.

Zusätzlich zur Pufferdimensionierung können mit Hilfe der Materialflusssimulation die einzelnen Arbeitssysteme hinsichtlich ihrer Bearbeitungszeit harmonisiert werden. Hierfür werden die Statistiken der Arbeitssysteme verwendet. Vor allem sind die Messgrö-

ßen „relative Belegung“, „Warte-“ und „Blockierzeit“ relevant. Im idealen Fall treten keine Blockier- und Wartezeit an allen Arbeitssystemen auf. Wird an einer Ressource eine Blockierzeit registriert, so bedeutet es, dass sie schneller als die darauf folgende arbeitet. Wird dagegen eine Wartezeit gemessen, so heißt es, dass die Ressource schneller als die davor stehende arbeitet.

Die Harmonisierung von zwei sukzessiven Prozesselementen könnte anschließend durch redundante Aufstellung des langsameren Arbeitssystems erfolgen. Weil eine solche Maßnahme in der Regel aus wirtschaftlichen Gründen ausgeschlossen wird, sollen zwei unterschiedliche Arbeitszeitmodelle erarbeitet werden, sodass beide Arbeitssysteme die gleiche maximale Kapazität erreichen.

Eine weitere Möglichkeit zum Ausgleich der maximalen Kapazität an beiden Arbeitssystemen ist die Erhöhung der technischen Verfügbarkeit des langsameren Systems. Hierfür werden die Parameter zur Modellierung der Störungen und somit der technischen Verfügbarkeit im Simulationsmodell schrittweise angepasst und die Simulationsstatistiken neu ausgewertet, bis beide Arbeitssysteme harmonisch laufen. Die resultierenden Einstellparameter werden dann an die Technologieabteilung in Form von logistischen Anforderungen übermittelt.

6.1.2 Nachhaltigkeit der Prozesskette

Nach der Einstellung der technischen Parameter und der Gestaltung der Prozesskette wird die logistische Fähigkeit der resultierenden Abläufe auf der Lieferkettenebene untersucht. Hierfür werden unterschiedliche Varianten von Lieferkettenverhalten simuliert, und die Lieferfähigkeit der aus der Technologieänderung resultierenden Prozesskette wird gemessen. Für den Rest dieser Arbeit werden diese Varianten *Logistikverhalten* genannt. Es werden drei Logistikverhalten simuliert:

- „Zuverlässige“ Kunden und Lieferanten: Unter der Annahme, dass das Kundenbestellverhalten sowie das Lieferverhalten von Lieferanten einer vordefinierten Planung entsprechen, wird das logistische Potenzial der Prozesskette hinsichtlich Lieferfähigkeit ermittelt.
- „Chaotische“ Kunden und Lieferanten: Werden Kundenbestell- sowie Lieferverhalten der Kunden bzw. Lieferanten als sehr schwankend modelliert, so werden die unteren Grenzwerte der Prozesskette erkannt.
- „Realitätsnahe“ Kunden und Lieferanten: Werden die Kunden und die Lieferanten basierend auf Vergangenheitswerten gemäß der Realität modelliert, so wird die Lieferfähigkeit der Prozesskette ausgewertet.

Das Ziel dieses Schrittes ist, zum einen die Grenzwerte der Prozesskette zu ermitteln (*Logistikverhalten* „zuverlässig“ und „Chaotisch“) und zum anderen die Robustheit der Prozesskette unter realen Bedingungen (*Logistikverhalten* „realitätsnah“) auf der Lieferkettenebene sicherzustellen. Wird eine niedrige Liefertreue gemessen, so muss die Prozesskette angepasst werden. Es besteht ebenfalls die Möglichkeit, Anforderungen an das Bestell- sowie Lieferverhalten der Kunden bzw. Lieferanten zu definieren.

Um die Modellierung und Simulation der gesamten Lieferkette sowie der verschiedenen Logistikvarianten zu ermöglichen, wird das Simulationsmodell modular aufgebaut. Hierfür werden drei verschiedene Simulationsmodule entwickelt, die durch Vervielfachung zu beliebigen Liefernetzwerken verkettet werden können. Diese drei Module entsprechen den Rollen der Beteiligten „Zulieferer“, „Produzent“ und „Kunde“ einer Lieferkette.

6.1.2.1 Modul Zulieferer

Der Kern dieses Moduls ist ein Algorithmus, welcher Lieferungen in Abhängigkeit von der bestellten Menge, vom Soll-Liefertermin und vom Lieferverhalten des Zulieferers generiert. Die bestellte Menge und der Soll-Liefertermin werden von der Produktionsplanung und -steuerung des produzierenden Unternehmens vorgegeben. Das Lieferverhalten des Zulieferers wird gemäß den folgenden Annahmen modelliert.

Die entscheidenden Modellierparameter sind die mittlere Terminabweichung und mittlere Mengenabweichung und deren jeweilige Streuung. Die Termin- und Mengenabweichung werden als Fehler (Abweichung vom Sollwert) betrachtet und vereinfachend mit einer Normalverteilungsfunktion modelliert. Es wird hierfür eine Messreihe mit einer Anzahl von Messwerten größer als 50 vorausgesetzt [STO07].

Die Parametrierung des Verhaltens eines Lieferanten beruht auf Vergangenheitsdaten, die im Monitoring-System des bestellenden Unternehmens zu finden sind.

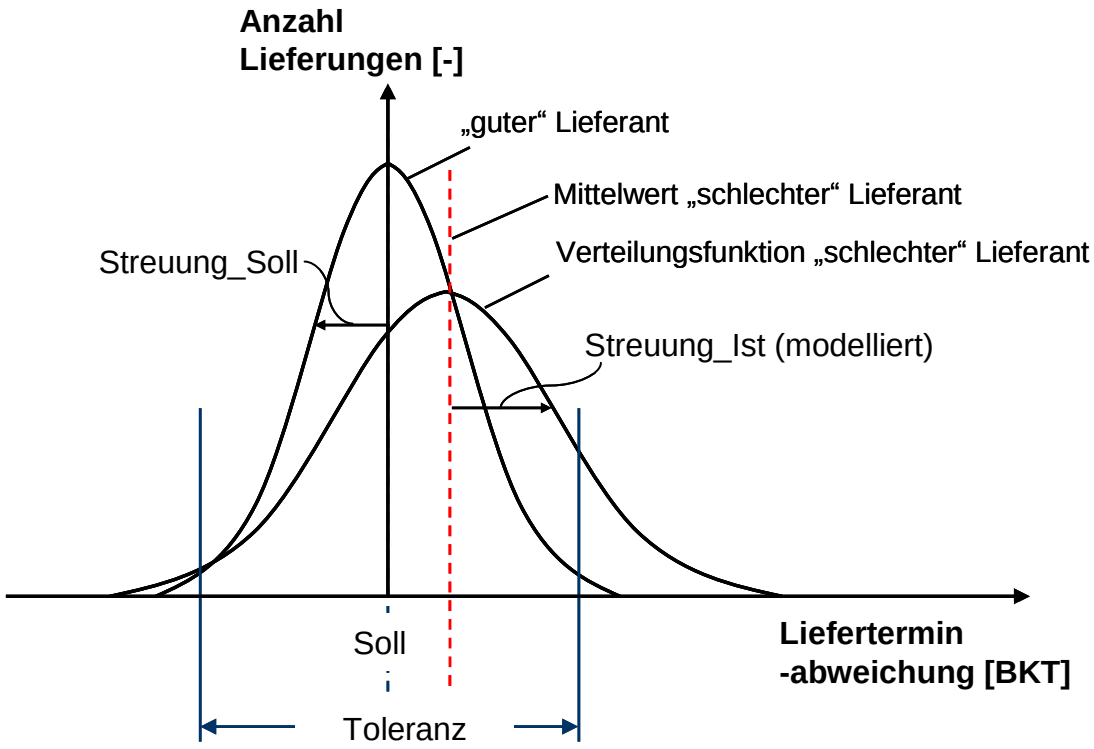


Bild 6-3: Modellierung des Lieferverhaltens mit der Normalverteilung

Bild 6-3 zeigt den Vergleich zwischen einem „guten“ und einem „schlechten“ Lieferanten auf Basis ihrer Verteilungsfunktion. Der „gute“ Lieferant erfüllt die Soll-Anforderungen. Seine Lieferterminabweichung streut innerhalb des Toleranzfensters

um den Nullwert. Seine Fähigkeit, termintreu zu liefern, entspricht der Kundenspezifikation und liegt in dem dargestellten Beispiel bei 96 %. Die Lieferterminabweichung des „schlechten“ Lieferanten schwankt zum einen um einen verschobenen Mittelwert und zum anderen mit einer größeren Standardabweichung. Dies resultiert in einer schlechteren Liefertermintreue, die im gleichen Beispiel bei ca. 78 % liegt.

Wird bei einem produzierenden Unternehmen eine neue Technologie eingeführt, die eine Restrukturierung und Neudimensionierung der Lieferkette erfordert, so können mit Hilfe des Simulationsmoduls „Zulieferer“ Grenzwerte für das Lieferverhalten ermittelt werden, die bei der Lieferantenauswahl sowie beim Abschließen von Rahmenverträgen berücksichtigt werden. Der ideale Lieferant wird zuerst modelliert, indem mittlere Terminabweichung, mittlere Mengenabweichung sowie deren Streuungen auf null gesetzt werden. Die Auswirkungen möglicher Unzuverlässigkeiten des Lieferanten auf die Einhaltung der logistischen Ziele des produzierenden Unternehmens können anschließend identifiziert werden, indem die Einstellparameter zur Modellierung des Lieferantenverhaltens schrittweise abweichend von den idealen Werten variiert werden.

Die Ergebnisse der Simulationsläufe unterstützen somit bei der Ermittlung des logistischen Potenzials sowie der Grenzwerte der aus der Technologieänderung resultierenden Prozesskette.

6.1.2.2 Modul Produzent

Das Simulationsmodul „Produzent“ bildet die innerbetrieblichen Prozesse eines produzierenden Unternehmens ab, die infolge der Technologieänderung entstehen.

Weil diese i. d. R. unterschiedliche Strukturen besitzen, die womöglich durch die Einführung einer neuen Technologie angepasst werden müssen, und weil mit demselben Modul die Simulation möglichst sämtlicher Strukturen ermöglicht werden soll, wurde dieses Modul generisch aufgebaut. Es wird aus dem Datenbestand automatisch generiert (vgl. 7.2.1).

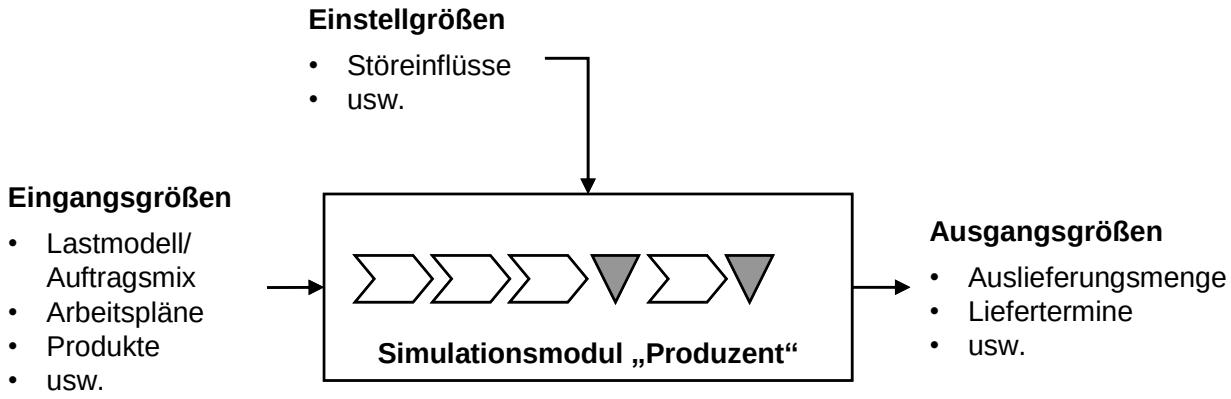


Bild 6-4: Strukturbild des Simulationsmoduls „Produzent“

Bild 6-4 zeigt das Strukturbild des Simulationsmoduls „Produzent“. Die Kernaufgabe dieses Moduls ist die Umsetzung der geplanten Fertigungsaufträge in zu produzierende Mengen, die dem Kunden zugeliefert werden. Zur Modellierung der Prozesse dienen

sowohl logistische als auch technologiespezifische Parameter (vgl. 5.1), die sämtlich in einer Datenbank gespeichert sind.

6.1.2.3 Modul Kunde

In konventionellen Simulationsmodellen werden die Kundenaufträge in einer statischen Liste gespeichert. Eigene Untersuchungen im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte sowie zahlreiche Literaturquellen haben aber gezeigt, dass die Kundennachfrage sehr dynamisch ist und nach einer Bestellung häufig noch Mengen- und Terminänderungen auftreten. Damit werden die internen Abläufe zur Produktionsplanung und -steuerung ständig beeinflusst [JAC06]. Für eine sichere Produktionsplanung ist daher die Berücksichtigung des tatsächlichen Kunden-Bestellverhaltens hinsichtlich Menge und Termin zwingend erforderlich. Deshalb wurde das Simulationsmodul „Kunde“ entwickelt, welches in Abhängigkeit von verschiedenen Einstellparametern realitätsnahe Bestellungen (Lieferabrufe) generiert und somit das in der Realität anzutreffende dynamische Verhalten des Kunden abbildet.

Vor allem in der Automobilindustrie bestehen zwischen produzierenden Unternehmen und den direkten Kunden Rahmenverträge, aus denen Bestellungen in Form von Lieferabrufen erfolgen. In den Rahmenverträgen werden sämtliche Modalitäten der Kunden-Lieferanten-Beziehung geregelt, vor allem aber Vereinbarungen über das Mengengerüst der zu liefernden Produkte. In regelmäßigen, vordefinierten Abständen ruft der Kunde seinen exakten Planbedarf der unmittelbar bevorstehenden Periode ab und gibt eine Prognose für den Bedarf zukünftiger Perioden. Bild 6-5 zeigt die tabellarische Darstellung eines Rahmenvertrags.

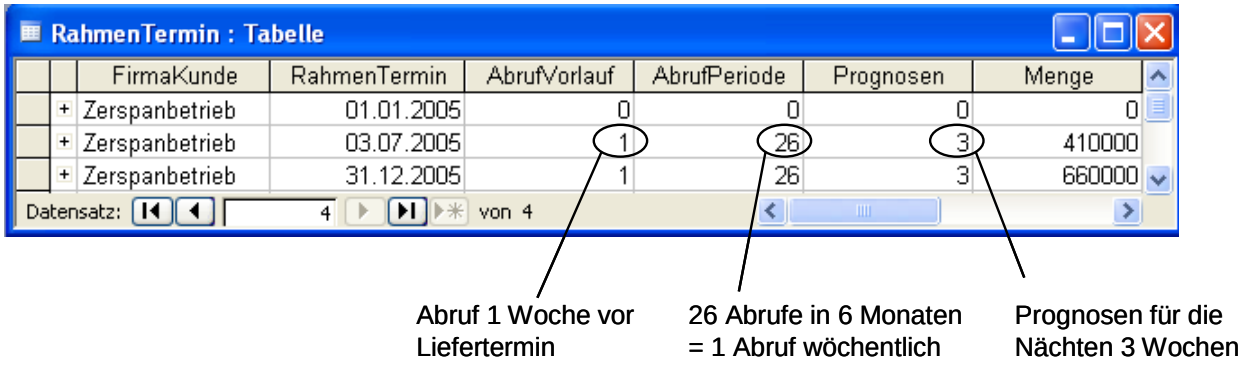


Bild 6-5: Tabellarische und grafische Darstellung eines Rahmenvertrags

Im dargestellten Beispiel wird ein Rahmenvertrag für eine Periode von 12 Monaten vereinbart, welcher in zwei Teilperioden aufgeteilt ist. Die erste Teilperiode dauert vom 01.01.2005 bis zum 03.07.2005 und ist somit 26 Wochen lang. In dieser Teilperiode werden 410.000 Schmiedeteile abgerufen. In der zweiten Teilperiode dagegen, die vom 03.07.2005 bis zum 31.12.2005 geht, werden insgesamt 660.000 Schmiedeteile abgerufen. Während der ganzen Periode ruft der Zerspanbetrieb wöchentlich ab und gibt gleichzeitig je eine Prognose für die darauf folgenden drei Wochen ab.

Ein Schwerpunkt des Simulationsmoduls „Kunde“ ist daher die Abbildung von Rahmenverträgen. Im Modell kann ein Rahmenvertrag aus mehreren Unter-Rahmenverträgen bestehen, um geplante Bedarfsschwankungen darzustellen. Weil diese Unter-Rahmenverträge unterschiedliche Bedarfsraten haben können, wird die Abbildung verschiedener Produktionsszenarien ermöglicht, wie z. B. Anlauf, Auslauf oder saisonale Schwankungen. Ein Rahmenvertrag bzw. Unter-Rahmenvertrag beginnt unmittelbar nach dem Ende des vorherigen Rahmenvertrags. Die Abrufperiode definiert den Abrufrhythmus. Beträgt diese Periode z. B. 7 Tage, so ruft der Kunde wöchentlich ab. Im Idealfall werden Produkte immer am Anfang einer Abrufperiode für die kommende Periode abgerufen. In der Realität treten jedoch Terminveränderungen auf. Diese werden toleriert, solange der Kunde seine Bedarfe für die unmittelbar bevorstehenden Perioden vor einem vordefinierten Abrufvorlauf bestellt.

Des Weiteren sieht das entwickelte Modul einen konfigurierbaren Algorithmus vor, welcher reale Lieferabrufe generiert. Die Konfigurationsparameter beschreiben dabei die verschiedenen Einflussfaktoren, die zur Veränderung des Bestellverhaltens führen. Diese Haupteinflussfaktoren sind die Änderungen der Marktnachfrage, die Liefertreue des direkten Zulieferers sowie das Reaktionsverhalten des Kunden. Diese Faktoren werden nachfolgend beschrieben:

- Die Marktnachfrage des fertigen Produkts am Markt kann nicht genau ermittelt werden, sondern muss geschätzt bzw. prognostisiert werden. Sie beeinflusst direkt die vom Kunden bei seinem Lieferanten abgerufenen Bedarfe. Mit steigender Marktnachfrage steigt der Primärbedarf des Kunden. Die tatsächlichen Abrufmengen weichen daher in der Regel von den Mengen aus dem Rahmenvertrag ab. Die Änderung der Marktnachfrage wird mit dem Nachfragefaktor **NF** modelliert (vgl. Gleichung (8)).
- Die Liefertreue des direkten Zulieferers gibt an, ob die vom Kunden abgerufenen Mengen tatsächlich wie vereinbart bei diesem eingetroffen sind. Liefert der Zulieferer zu viel oder zu wenig, so passt in der Regel der Kunde seine Abrufmengen an, damit sich kein unnötiger Bestand bildet bzw. damit die Fehlmengen ausgeglichen werden.
- Das Reaktionsverhalten des Kunden beschreibt, wie der Kunde auf Fehlmengen in seinem Wareneingangslager bzw. auf Überlieferungen reagiert. Das Reaktionsverhalten des Kunden wird mit den zwei Faktoren Fehlmengenausgleichsfaktor **α** und Lieferschwankungsausgleichsfaktor **β** modelliert (vgl. Gleichung (9)).

Das Generieren der Lieferabrufe basiert auf der folgenden Gleichung:

$$AM_{n+1} = \left(100\% + \beta * \left(\frac{AM_n - LM_n}{\max\{AM_n; LM_n\}}\right)\right) * \left(RVM_{n+1} * NF + \alpha * \left(AM_n - LM_n\right)\right) \quad (9)$$

mit

AM_n	abgerufene Menge [ME] der Periode n
LM_n	gelieferte Menge [ME] der Periode n
RVM	Rahmenvertragsmenge [ME]

α	Konfigurationsparameter „Fehlmengenausgleich“ für die Modellierung des Reaktionsverhaltens [%]
β	Konfigurationsparameter „Lieferschwankungsausgleich“ für die Modellierung des Reaktionsverhaltens [%]
n	laufende Abrufperiode
NF	Konfigurationsparameter für die Modellierung der Veränderung der Marktnachfrage [%]

Bei einer konstant bleibenden Nachfrage erhält **NF** den Wert 100 %. Bei einer steigenden bzw. sinkenden Nachfrage erhält **NF** einen Wert über bzw. unter 100 %. Der erste Schritt bei der Ermittlung der prognostisierten Abrufmenge ist die Berücksichtigung dieses Einflussfaktors, der durch den Ausdruck $\boldsymbol{(RVM_{n+1}*NF)}$ aus Gleichung (9) dargestellt wird. Dann wird die Fehlmenge aus der letzten Bestellung kompensiert. Diese Fehlmenge ist gleich der Differenz aus den Soll-Zugängen (abgerufener Menge **AM**) und Ist-Zugängen (gelieferter Menge **LM**). Je nach Reaktionsverhalten des Kunden wird der Konfigurationsparameter **α** eingestellt. Will der Kunde die ganze Fehlmenge ausgleichen, wird **α** gleich 100 % gesetzt. Reagiert der Kunde überhaupt nicht auf die Fehlmenge, so wird **α** gleich 0 % gesetzt. Wenn der Kunde nur einen Teil der Fehlmenge ausgleichen will, nimmt **α** einen Wert zwischen 0 % und 100 % an.

Daraus entsteht die Gleichung (9), die sowohl die schwankende Marktnachfrage als auch die Kundenreaktion auf Unter- bzw. Überlieferung der Vorperiode abbildet. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass der Kunde mit einer erneuten Über- bzw. Unterlieferung seines Zulieferers rechnet. Für diesen Zweck wird die Liefermengenabweichung aus der letzten Lieferung in Prozent errechnet und mit dem Konfigurationsparameter **β** kompensiert. In Analogie zu **α** kann **β** einen Wert zwischen 0 % und 100 % haben.

Diese Konfigurationsparameter werden basierend auf Vergangenheitsergebnissen eingestellt. In Analogie zur Auswertung von Lieferantenverhalten und deren Auswirkungen auf die Erreichung logistischer Ziele eines produzierenden Unternehmens können verschiedene Kundenszenarien modelliert und simuliert werden.

6.2 Simultane logistische und technische Parameteradaptation

Wie bereits erwähnt, ist die Wachstumsphase einer Technologie durch große und offene technische Potenziale gekennzeichnet. Mit diesen technischen Potenzialen sind auch logistische Potenziale verbunden, die nur durch zielgerechte Parameterkonfiguration und kontinuierliche Parameteranpassung ausgeschöpft werden können [JÄG00]. In Bezug auf den kontinuierlichen Anpassungsbedarf sind an dieser Stelle ausschließlich die logistisch relevanten Parameter im PPS-System von Interesse, die in einem direkten Zusammenhang mit den technologiespezifischen technischen Parametern stehen.

Für den effizienten logistischen Einsatz der neuen Technologie während der Wachstumsphase, insbesondere zwischen den Zeitpunkten der ersten Einführung und der vollständigen Ablösung der alten Technologie, ist die kontinuierliche Adaptation der Parameter zur Produktionsplanung und -steuerung von entscheidender Bedeutung. Dabei sind folgende Fragestellungen bzw. Schwierigkeiten zu bewältigen:

- Welche Parameter beim Auftreten welcher Probleme bzw. Auslöser müssen angepasst werden?
- In welchem Zusammenhang stehen die logistischen Planparameter mit den technologiespezifischen Parametern (wie z. B. Schnittgeschwindigkeit)?
- Welche Wechselwirkung besteht zwischen den einzelnen Parametern?

Es ist daher ein methodisches Vorgehen zur Adaptation der Planparameter gefragt, welches die logistischen Parameter in Abhängigkeit von den technologischen Kennwerten darstellt und die Wechselwirkung zwischen den einzelnen Stell- und Regelgrößen veranschaulicht. Bild 6-6 verdeutlicht den methodischen Ablauf zur Adaptation der Planparameter im PPS-System.

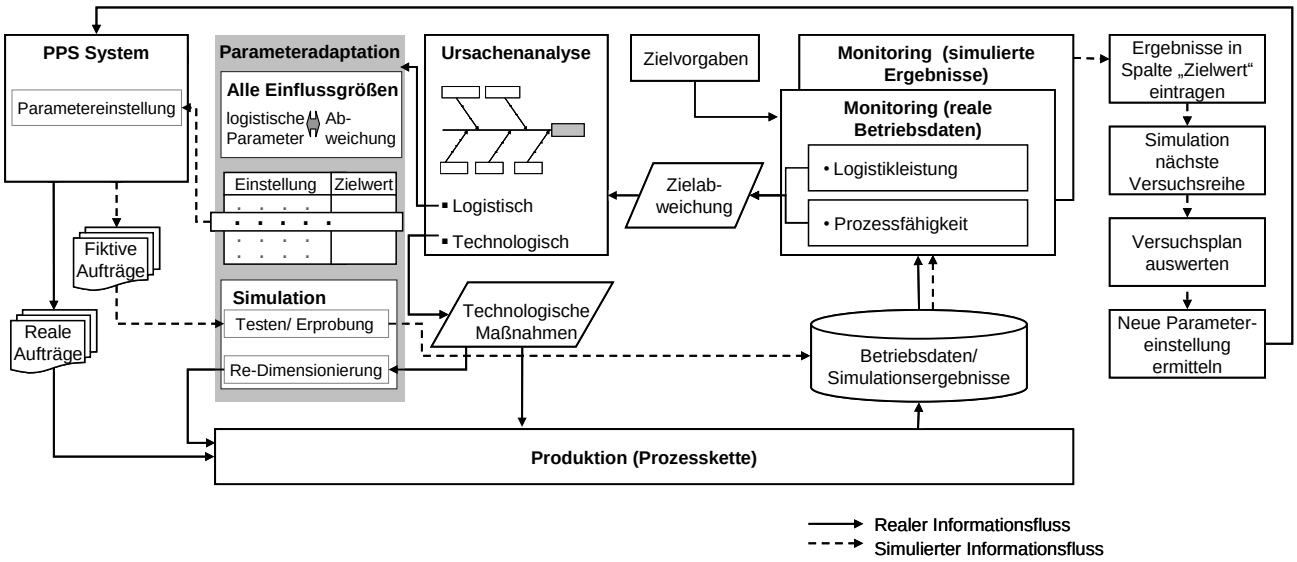


Bild 6-6: Grundprinzip der PPS-Planparameteradaptation

Man erkennt zwei unterschiedliche Informationsflüsse. Der reale Informationsfluss stellt die gemessenen Übergabedaten zwischen dem PPS-System, der Produktion und der Monitoringkomponente dar. Der simulierte Informationsfluss zeigt dagegen die bei der aktuellen Parametereinstellung zu erwartenden Ergebnisse. Dabei werden die realen Produktionsprozesse durch ein Simulationsmodell zum Zwecke der Erprobung der Planungsdaten ersetzt. Sowohl die realen als auch die simulierten Daten werden in derselben Datenbank gespeichert. Mit Hilfe derselben Monitoringkomponente, die einen direkten Zugriff auf die Datenbank hat, werden die Ergebnisse in Form von Kennzahlen und Grafiken ausgewertet.

Neben der Logistikleistung wird die logistische Prozessfähigkeit (vgl. 2.2.1) gemessen. Weisen die Ergebnisse aus dem Monitoring auf eine unzulässige Abweichung von den vorgegebenen Zielen hin, so müssen Maßnahmen erarbeitet werden. Während der Analyse der Ursachen, die zur Zielabweichung geführt haben können, wird die Art der abzuleitenden Maßnahmen erkannt. Je nach Abweichungsverursacher ist zwischen technischen und logistischen Maßnahmen zu unterscheiden. Die technischen Maßnahmen betreffen in erster Linie die Parametrierung der Prozesskette wie z. B. Neueinstellung der Vorschubgeschwindigkeit bei einer spanenden Maschine oder der Tempe-

ratur bei einer Schmiedepresse. Hierzu muss die Zulässigkeit geprüft und eine Änderungsfreigabe durch die technische Abteilung erteilt werden. Die dargestellte Methode setzt somit eine enge Zusammenarbeit zwischen den Produktions- und Entwicklungsabteilungen voraus.

Die Auswirkung der technischen Neuparametrierung auf die logistische Gestaltung der Prozesskette wird mit Hilfe der Materialflusssimulation untersucht, um notwendige Änderungen bei der Strukturierung oder logistischen Dimensionierung der Prozesskette abzuleiten. Eine Erhöhung der Schmiedetemperatur z. B. erfordert einen der Presse nachgelagerten Puffer mit einer größeren Kapazität, weil die erhöhte Schmiedetemperatur zwangsläufig zu einer längeren technisch bedingten Wartezeit (Abkühlzeit der geschmiedeten Teile) und somit zu längeren Übergangszeiten führt.

Die logistischen Maßnahmen betreffen die Planparameter im PPS-System, deren Neueinstellung auf einer simulationsbasierten Versuchsplanung beruht.

Die entwickelte Methode ist im Wesentlichen durch die folgenden drei Merkmale gekennzeichnet:

- Einbeziehung der Ergebnisse aus dem Monitoring zur kontinuierlichen Parameteranpassung,
- Einbindung der Materialflusssimulation in die Produktionsplanung sowie
- Nutzung der statistischen Versuchsplanung (DoE – Design of Experiment) zur Entscheidungshilfe bei der Neuparametrierung.

Im Folgenden werden die einzelnen Schritte der Methode genauer beschrieben.

6.2.1 Einbindung der Ergebnisse aus dem Monitoring

Das Monitoring dient zur Messung und Visualisierung der durch die Produktionssysteme erbrachten Logistikleistung. Deshalb sind sämtliche logistischen Größen aus dem Logistikzielsystem (vgl. Abschnitt 2.2.2) zu messen und kontinuierlich mit den Zielvorgaben zu vergleichen. Diese Zielvorgaben entstammen der strategischen Unternehmensplanung und werden ins PPS-System eingegeben. Des Weiteren werden im die für die Logistik relevanten technischen Kennzahlen erfasst. Hiermit sind hauptsächlich die produzierte Ausschussquote und die technische Verfügbarkeit gemeint.

Die produzierte Ausschussquote beeinflusst direkt die Ausbringung eines Arbeitssystems und ist bedeutend für die Programmplanung. Die technische Verfügbarkeit wirkt sich auf die maximal mögliche Leistung eines Arbeitssystems aus und ist somit entscheidend bei der logistischen Positionierung eines Arbeitssystems (vgl. Abschnitt 5.1).

Vor allem während der Wachstumsphase einer Technologie erreichen diese technischen Merkmale längst nicht ihre Potenzialgrenzen. Sie werden stattdessen im Laufe der Zeit kontinuierlich verbessert. Weil sie sich auf die Logistik entscheidend auswirken, werden sie kontinuierlich beobachtet, um die logistischen Parameter in Abhängigkeit von der technischen Entwicklung zu adaptieren. Tabelle 6-1 fasst die zu messenden Kennzahlen zusammen.

Tabelle 6-1: Von der Monitoringkomponente berechnete Kennzahlen

Kennzahlen Logistikleistung	Kennzahlen Logistikkosten	Technologische Kennzahlen
▪ Mittlere Auftrags-Durchlaufzeit ▪ Mittlere Durchlaufzeit der Arbeitssysteme ▪ Mittlerer Bestand je Arbeitssystem ▪ Mittlere Leistung je Arbeitssystem ▪ Liefertreue im Zugang und im Abgang für das Gesamtsystem ▪ Mittlere Terminabweichung im Abgang und Zugang für das Gesamtsystem	▪ Gesamtkostensatz	▪ Mittlere Ausschussquote ▪ Technische Verfügbarkeit

Bei den Kennzahlen zur Messung der Logistikleistung ist im Wesentlichen zwischen auftrags- und arbeitssystembezogenen Kennzahlen zu unterscheiden. Die auftragsbezogenen Kennzahlen sind die mittlere Auftragsdurchlaufzeitzeit und deren Streuung. Wie bereits bei der Darstellung des Modells der Durchlaufelemente beschrieben (vgl. Abschnitt 2.2.2), sind die Zeitpunkte der Auftragsfertigstellung bzw. des Auftragsanstoßes entscheidend für die Berechnung der Auftragsdurchlaufzeit.

Die mittlere Durchlaufzeit, der mittlere Bestand und die mittlere Leistung stellen die wichtigsten arbeitssystembezogenen Kennzahlen dar. Für die Berechnung dieser Kennzahlen kann das Durchlaufdiagramm (vgl. Abschnitt 5.1.1) verwendet werden. Die Durchlaufzeit errechnet sich aus der Differenz zwischen dem Abmeldezeitpunkt am betrachteten Arbeitssystem und dem Abmeldezeitpunkt am Vorgängerarbeitssystem. Der mittlere Bestand ergibt sich aus der Differenz zwischen den kumulierten Zugängen und Abgängen an einem Arbeitssystem bezogen auf eine Zeitperiode. Werden alle mittleren Bestände der einzelnen Arbeitssysteme addiert, so ergibt sich der mittlere Gesamtbestand in der kompletten Fertigungskette. Die mittlere Leistung eines Arbeitssystems resultiert aus seiner kumulierten Ausbringung in einer Zeitperiode bezogen auf die Periodenlänge.

Wird die Logistikleistung nicht nur innerbetrieblich, sondern auch auf einer Lieferkettenebene betrachtet (vgl. 2.2.2), so kommt der Liefertreue eine große Bedeutung zu. Die Liefertreue beinhaltet sowohl die Termin- als auch die Mengentreue. Diese Kennzahlen werden im Zugang und Abgang des Gesamtsystems gemessen. Die Liefertreue

im Zugang vergleicht die tatsächlich angekommenen mit den bestellten Lieferungen und bewertet das Lieferverhalten des Lieferanten. Werden diese Kennzahlen im Abgang gemessen, so wird das eigene Lieferverhalten beurteilt. Dabei werden die Abgangsmengen und -termine mit den Kundenbestellungen verglichen.

Für die Messung der Logistikeffizienz, welche das Verhältnis von Aufwand und Nutzen logistischer Leistungen bezeichnet [WEB02], müssen neben der Logistikleistung die Logistikkosten errechnet werden. Mit Hilfe der Prozesskostenrechnung werden die einzelnen Kostenarten einer Kostenstelle den logistikrelevanten Prozesselementen direkt zugeordnet. Somit kann eine Aussage abgeleitet werden, wie sich die Höhe der Kosten in den Kostenstellen bei einer logistischen Veränderung der Prozesskette verhält und welche Kosten durch die einzelnen Prozesselemente verursacht werden [KER02]. Die Logistikkosten ergeben sich aus der Summe der Bearbeitungs-, Bestands-, Rüst- und Prozesskosten der PPS. Sowohl diese einzelnen Kostenanteile als auch die Gesamtkosten werden in Form von Kennzahlen erfasst.

Eine weitere wichtige technologiespezifische Kennzahl ist die Ausschussmenge bzw. Ausschussquote. Eine hohe Rate an Ausschuss verringert die Ausbringung und erhöht die Herstellungskosten. Deshalb ist ein kontinuierliches Monitoring dieser Kennzahl von großer Bedeutung (vgl. Abschnitt 5.1.1.2).

Zusätzlich zur Berechnung der produzierten Ausschussquote wird im Monitoring die technische Verfügbarkeit eines Arbeitssystems ermittelt. Hierfür werden sämtliche Ausfälle des Arbeitssystems dokumentiert.

Die Hauptaufgabe des Monitorings ist zum einen, die Abweichungen der gemessenen Kennzahlen von den Planwerten zu ermitteln, und zum anderen, die logistische Prozessfähigkeit zu kontrollieren (Bild 6-7).

Zuerst wird die Zielabweichung der aus der Fertigung bzw. Materialflusssimulation zurückgemeldeten Daten gemessen. Die Zielabweichung ergibt sich aus der Differenz zwischen dem vordefinierten und dem gemessenen Wert einer Zielgröße. Idealerweise beträgt die Abweichung null. Im Realfall sind aber immer Toleranzen definiert.

In regelmäßigen Zeitabständen wird eine Reihe von Zielabweichungen errechnet. Wird bspw. die Zielgröße „Auftragsdurchlaufzeit“ ausgewertet und es werden *n* Fertigungsaufträge in der betrachteten Zeitperiode abgefertigt, so entsteht am Ende eine Messreihe von *n* Werten.

Im zweiten Schritt wird geprüft, ob die resultierende Messreihe normalverteilt ist. Bei einer statistischen Auswertung eines Fehlers sind die Messwerte als normalverteilt zu erwarten [STO07]. Weil jede Zielabweichung als Fehler zu betrachten ist, sollen die Erwartungswerte ebenfalls normalverteilt sein. Hierfür bieten sich verschiedene Verfahren an. Die gängigen Verfahren sind „Kolmogorov-Smirnov-Test“ [FAH02], „Quantile-Quantile Plot Method“ [HAR05] und „Chi-squared Goodness of Fit Test“ [STE04]. Sind die Messwerte nicht normalverteilt, so heißt dies, dass der Prozess nicht beherrscht wird [STE04]. In diesem Fall wird eine neue Parametrierung der logistischen Prozesse notwendig.

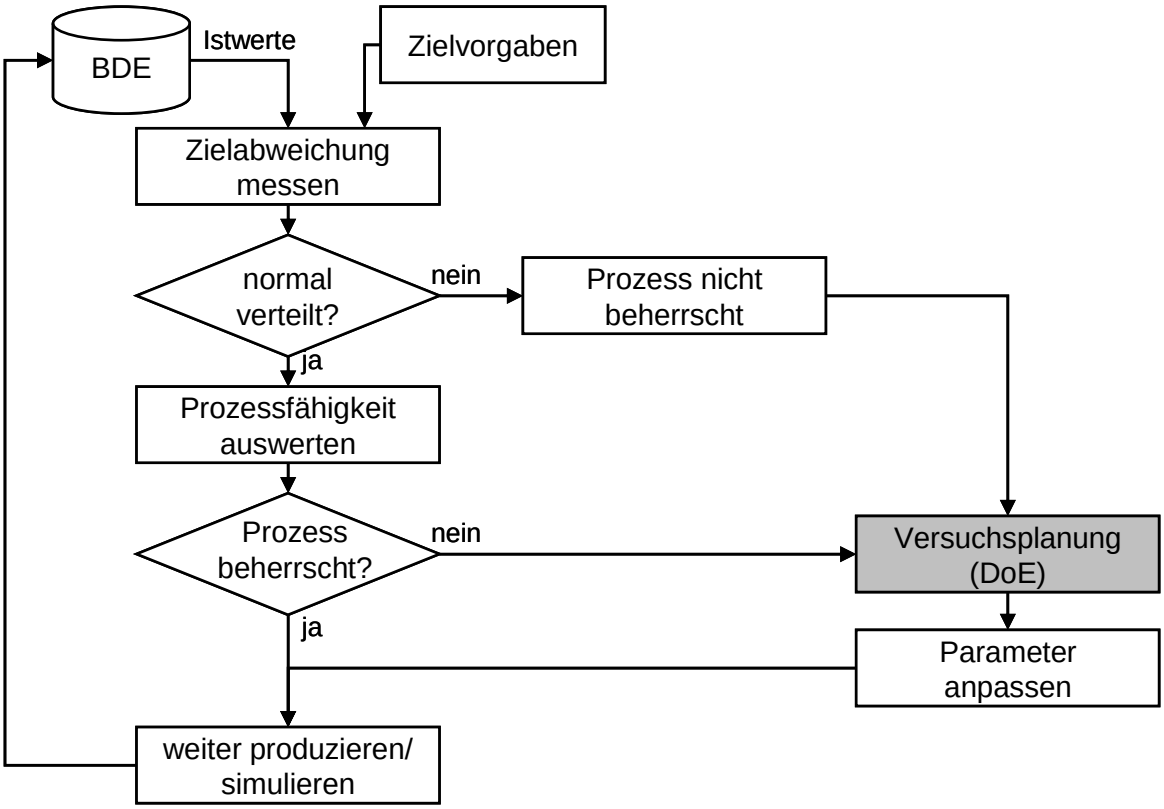


Bild 6-7: Vorgehensweise zur Messung der logistischen Prozessfähigkeit

Ist dagegen der Datensatz normalverteilt, so werden im darauf folgenden Schritt die Kennwerte C_p und C_{pk} berechnet (vgl. 2.2.1). Diese beiden Werte zeigen, inwiefern der Prozess hinsichtlich der betrachteten Zielgröße beherrscht wird. Wird der Prozess nicht beherrscht, so bedarf es einer neuen Parametrierung der Prozesse.

Für die notwendige Anpassung der Parameter wird die Methode der statistischen Versuchsplanung (DoE) angewandt.

Überschreiten die gemessenen Abweichungen einen vordefinierten Bereich oder werden die Prozesse aus Sicht der Logistik nicht beherrscht, so müssen zuerst die Ursachen ermittelt werden, die dazu geführt haben.

6.2.2 Analyse von Ursachen

Um die Zielabweichungsursachen und deren Zusammenhänge systematisch zu ermitteln und zu analysieren, bietet sich das Ursache-Wirkungs-Diagramm an, das auch Ishikawa- oder Fischgrätendiagramm genannt wird.

Nach der Erkennung der Zielabweichungen werden mögliche Einzelfehlerursachen identifiziert, in Klassen unterteilt und in das Ishikawa-Diagramm eingetragen. Prinzipiell lassen sich die Ursachen für technische Probleme qualitativ auf die sogenannten 5M-Einflussfaktoren zurückführen. Diese sind Material, Maschine, Methode, Mensch und Mitwelt [HER93]. Das Ursache-Wirkungs-Diagramm wird auch erfolgreich zur Untersuchung von Einflussfaktoren eingesetzt, die systematisch oder zufällig auf die logistische Zielerreichung einwirken [WIE02]. Dabei entspricht die Methode der Produktionspla-

nung und -steuerung, die Maschine dem Fertigungsprozess, das Material den Ablaufdaten, der Mensch dem Personal und die Mitwelt dem Produktionsumfeld.

Bild 6-8 zeigt ein exemplarisches Fischgrätendiagramm (Ishikawa-Diagramm) zur Darstellung von Ursachen für das Nichterreichen der Zielausbringung an einem Arbeitssystem.

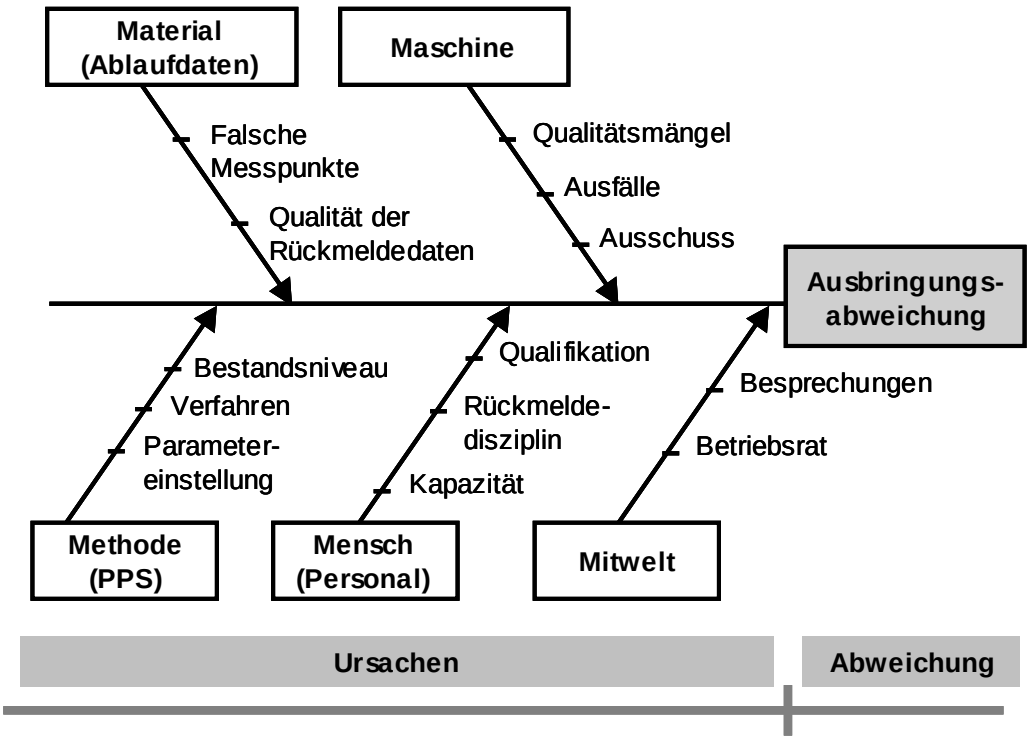


Bild 6-8: Exemplarisches Ursache-Wirkungs-Diagramm für die Nichterreichung der geplanten Ausbringung

So kann u. a. eine schlecht parametrierte oder ungeeignete Methode der Produktionsplanung und -steuerung die Ausbringungsabweichung verursachen. Eine falsche Vorgabe der maximal möglichen Leistung eines Arbeitssystems, z. B. durch falsche Annahmen über die technische Verfügbarkeit, resultiert in nicht realisierbaren Zielvorgaben. Des Weiteren kann ein ungeeignetes Steuerungsverfahren zur Unterlast des Arbeitssystems führen und somit zu einer niedrigeren Ausbringung als geplant. Darüber hinaus können Maschinenmängel zu einer erhöhten Ausschussquote führen, was wiederum in einer Ausbringungsabweichung resultiert. Maschinenausfälle und Werkzeugbrüche verursachen ebenso Ausbringungsabweichungen.

Nach der Identifikation möglicher Risiko- bzw. Zielabweichungsverursacher müssen diese in technische und logistische Ursachen gruppiert werden, um die passenden Maßnahmen zu erarbeiten. In der Regel wird durch die Adaptation von Parametern der Produktionsplanung und -steuerung auf die logistischen Ursachen reagiert. Um die technischen Ursachen zu beheben, ist eine weitere, genauere Untersuchung erforderlich. Dies kann durch zahlreiche Methoden der Qualitätssicherung wie z. B. die Maschinenfähigkeitsuntersuchung, Fehlerbaumanalyse oder Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse [HER93] unterstützt werden. Die technischen Maßnahmen betreffen in direkter

Weise die Maschinen und die technologische Auslegung der Prozesse. Sie besitzen dennoch einen weiteren Einfluss auf die logistischen Planparameter. Die Analyse der Zusammenhänge zwischen den technischen und logistischen Maßnahmen erfolgt als erster Schritt der Parameteradaptation. Hierzu dienen die in Kap. 5.2 ermittelten Zusammenhänge als Basis.

6.2.3 Simulationsbasierte Parameteradaptation

Die Parameteradaptation stellt den Kern der in Bild 6-6 skizzierten Methode dar. In diesem Schritt werden die entscheidenden Parameter und deren Neuwerte zur Behebung der Zielabweichung ermittelt. Bei diesen Parametern handelt es sich um Parameter zur logistischen Dimensionierung der Prozesskette sowie Planparameter im PPS-System. Aus diesem Grund hat die Parameteradaptation vor allem die folgenden zwei Hauptaufgaben:

- Erkennung der Auswirkung der technischen Maßnahmen auf die logistische Auslegung der Prozesskette und ggf. Neustrukturierung und -dimensionierung dieser Prozesskette (vgl. 6.2.3.1).
- Anpassung der Planparameter im PPS-System und Ableitung logistischer Anforderungen an die Technologie (6.2.3.2).

6.2.3.1 Anpassung der Parameter zur logistischen Gestaltung der Prozesskette

Eine Anpassung der Einstellparameter zur logistischen Gestaltung der Prozesskette ist erforderlich, wenn die in Abschnitt 6.2.2 identifizierten Fehler- bzw. Abweichungsursachen technischer Natur sind. Ein technischer Verursacher, der zu einer Nichterreichung der geplanten Ausbringung (vgl. Bild 6-8) geführt hat, kann z. B. eine erhöhte Ausschussrate oder eine geringe technische Verfügbarkeit einer Maschine sein. In diesem Fall gehört es zu den Aufgaben der Entwicklungs- und Konstruktionsabteilung – bei einigen Unternehmen auch Engineering-Abteilung genannt –, die Hauptgründe für diese hohe Ausschussrate bzw. niedrige technische Verfügbarkeit zu hinterfragen. Meistens endet dieser Schritt mit dem Ergreifen technischer Maßnahmen. Durch die Anpassung der Geschwindigkeitswerte bei einem spanenden Prozess kann z. B. die Ausschussrate reduziert werden.

Die zentrale Idee bei der hier erarbeiteten Methode ist es, eine simultane logistische und technische Verbesserung der Fertigungsprozesse zu ermöglichen. Deshalb werden zuerst die erarbeiteten technischen Maßnahmen aus logistischer Sicht auf ihre Wirksamkeit geprüft. Hierfür wird die Materialflusssimulation als Werkzeug genutzt.

Mit Hilfe der Materialflusssimulation werden die Auswirkungen der technischen Maßnahmen auf die Erreichung der logistischen Ziele ermittelt. Daraus werden die technologisch bedeutsamen Parameter erkannt. Ferner unterstützt die Simulation die Neudimensionierung der Prozesskette, wenn erforderlich. Zusätzlich wird die Empfindlichkeit des aus der technischen Anpassung resultierenden Systems gegenüber unterschiedlichen Auftragsmix-Varianten gemessen. Bild 6-9 zeigt die Vorgehensweise.

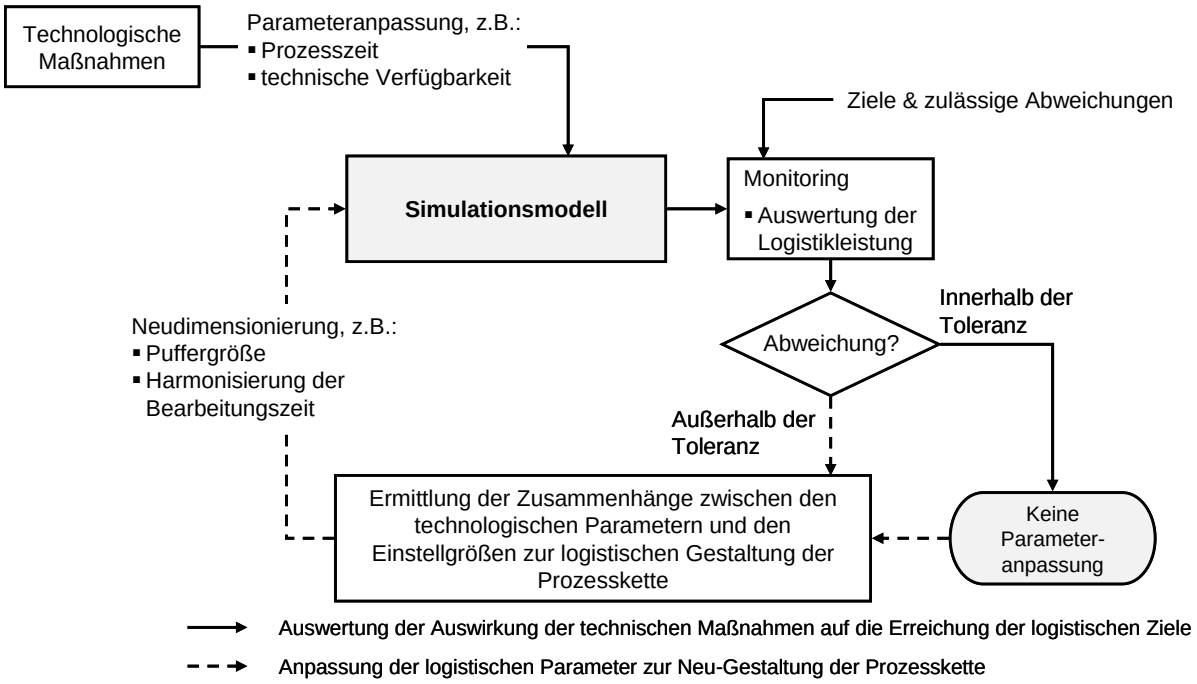


Bild 6-9: Nutzung der Materialflusssimulation zur Gestaltung von Prozessketten

Es ist dabei zwischen zwei unterschiedlichen Informationsflüssen zu unterscheiden. Der erste, mit durchgehenden Verbindungslinien abgebildet, dient der Erkennung von Auswirkungen der technischen Maßnahmen auf die Erreichung der logistischen Ziele. Der zweite Informationsfluss, mit gestrichelten Linien dargestellt, zeigt die Schritte zur Umstrukturierung bzw. Neudimensionierung der Prozesskette.

Zuerst werden die technischen Maßnahmen in Form von angepassten technologischen Parametern im Simulationsmodell eingestellt. Anschließend wird die Simulation gestartet, und die Logistikleistung wird mit Hilfe der Monitoringkomponente ausgewertet. Werden die vordefinierten Zielvorgaben erreicht, so besteht kein Bedarf zur Umstrukturierung bzw. Neudimensionierung der Prozesskette.

Die Ziele werden entsprechend der Unternehmensstrategie definiert und geben bestimmte Werte für Liefertreue, Auslastung der Produktionssysteme, Auftragsdurchlaufzeit sowie Umlaufbestand vor. Diese unterscheiden sich von einer Technologie zur anderen und hängen von der logistischen Positionierung des Unternehmens ab.

Werden Zielabweichungen gemessen, so müssen die Einstellgrößen zur Gestaltung der Prozesskette angepasst werden. Die Neudimensionierung der Prozesskette erfolgt in Analogie zur ursprünglichen Dimensionierung, die während der Technologieeinführungsphase mit Hilfe der Materialflusssimulation durchgeführt wurde (vgl. 6.1.1).

Basierend auf den in Abschnitt 5.2 beschriebenen Zusammenhängen werden in diesem Schritt je nach technischer Kenngröße die anzupassenden Parameter zur logistischen Gestaltung abgeleitet.

Anhand des folgenden Beispiels soll die logistische Neudimensionierung der Prozesskette infolge einer technischen Korrekturmaßnahme veranschaulicht werden.

Bei einer Untersuchung der Fertigungsabläufe eines europäischen Schmiedeunternehmens wurde nach der Schmiedepresse eine mittlere Ausschussquote von 6 % gemessen gegenüber einer geplanten Ausschussquote von 2 %. Nach einer gründlichen Untersuchung des Problems wurde festgestellt, dass die Erwärmung durch den der Schmiedepresse vorgelagerten Induktionsofen aufgrund einer zu kurzen Taktzeit der Auslöser für die erhöhte Ausschussquote war. Dadurch, dass die ungenügende Erwärmungszeit zu kurz und die Temperatur an der Oberfläche zu hoch war, erreichten die Werkstücke die für das Schmieden notwendige Temperatur, ohne dass der Kern der Werkstücke genügend heiß wurde. Dies führte zu einem schlechten Werkstoffffluss beim Schmieden und somit zu einem erhöhten Ausschuss.

Deshalb wurde entschieden, die Leistung des Induktionsofens zu reduzieren und somit die Erwärmungszeit zu verlängern. Diese technische Maßnahme hat vorerst das Problem lokal gelöst, aber zu einem weiteren Problem geführt. Durch die Verlängerung des Erwärmungstakts musste die Schmiedepresse wegen nicht abgestimmter Taktung auf die erwärmten Werkstücke warten. Dadurch wurde die Kapazität der Presse nicht ideal genutzt und demzufolge eine geringere Ausbringung als zuvor erreicht. Mit Hilfe der Materialflusssimulation wäre es möglich gewesen, die vorgenommene technische Maßnahme auf ihre Wirksamkeit zu testen und ggf. weitere logistische Maßnahmen zu erarbeiten. In diesem Fall wäre eine logistische Restrukturierung der Prozesskette an der Stelle zwischen der Erwärmung und dem Schmieden angebracht. Die passende Maßnahme wäre eine redundante Aufstellung des Induktionsofens in der Form, dass beide Öfen zusammen die Ausbringungsrate der Schmiedepresse erzielen könnten. Vor der Implementierung einer solchen Maßnahme soll aber zuerst eine Wirtschaftlichkeitsprüfung durchgeführt werden.

6.2.3.2 Planparameter im PPS-System

Die zweite Kernaufgabe der Parameteradaptation betrifft die Planparameter im PPS-System. Hierfür ist die simulationsbasierte Versuchsplanung vorgesehen. Das Ziel der simulationsbasierten Versuchsplanung ist es, die für das Erreichen der vordefinierten logistischen Ziele wesentlichen Parameter zu ermitteln und simulationsgestützt auf zielführende Werte einzustellen. Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode ist die Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Parametern.

Die in produzierenden Unternehmen eingesetzten PPS-Systeme und die darin vorzunehmenden Einstellungen sind in der Regel sehr komplex [TES03]. Bereits bei der Erstkonfiguration der PPS-Systeme werden pro Artikel in den Stammdaten zwischen 40 und 70 Parameter eingestellt [JÄG00, DIT03]. Durchschnittlich sind in den eingesetzten PPS-Systemen zwischen 5.000 und 350.000 Artikel gespeichert, sodass theoretisch über eine Million Parameter eingestellt werden können [DIT03]. Deshalb ist ein manuelles Beherrschen aller Parameter bei einer derartigen Vielzahl ohne methodisches Hilfsmittel kaum möglich. In der Praxis werden die Artikel in Klassen eingruppiert und die Parameter pro Gruppe einmalig eingestellt. Mit Hilfe der statistischen Versuchsplanung, auch Design of Experiment (DoE) genannt, können in einem ersten Schritt die relevanten Parameter und deren Wechselwirkungen identifiziert werden, bevor deren neue Werte in einem zweiten Schritt ermittelt werden.

Die in dieser Arbeit vorgesehene Methode zur simulationsbasierten Versuchsplanung erfolgt in sieben Schritten (Bild 6-10).

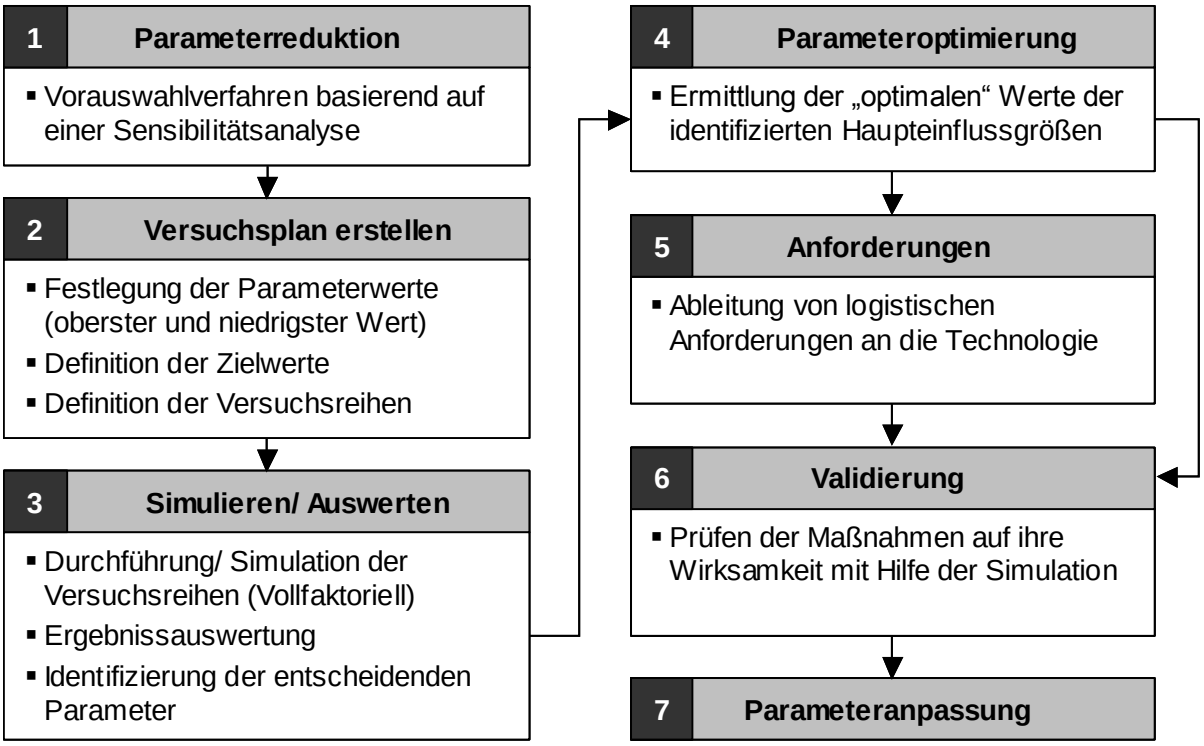


Bild 6-10: Ablauf der simulationsbasierten Versuchsplanung

In Schritt (1) wird die Anzahl der während der Ursachenanalyse identifizierten möglichen Einflussfaktoren reduziert. Insbesondere, wenn eine große Anzahl von Einfluss- bzw. Stellgrößen für die errechnete Zielabweichung identifiziert wird, ist es wichtig, diese so weit wie möglich entsprechend ihrer Relevanz zu reduzieren. Hierdurch lässt sich die erforderliche Anzahl von Simulationsversuchen und somit der simulative Versuchsaufwand signifikant senken. So sind z. B. bei 8 verschiedenen Stellgrößen, die jeweils 2 verschiedene Einstellungswerte haben, 256 Simulationsversuche erforderlich. Eine Reduktion auf 4 Stellgrößen würde die Anzahl auf 16 verringern. Für diesen Zweck werden die tatsächlich entscheidenden Stellgrößen ermittelt, welche die ermittelten Zielabweichungen direkt beeinflussen. Hierfür bieten sich verschiedene Verfahren an, wie z. B. der paarweise Vergleich, die Komponentensuche, die Multivariationskarten oder die Variablensuche. Diese Verfahren werden an dieser Stelle der Arbeit nicht detailliert vorgestellt. Es wird auf die Literatur von Quentin [QUE92], Hering [HER93] und Klein [KLE04] verwiesen.

In dieser Arbeit wird die Sensitivitätsanalyse verwendet. Mit Hilfe der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Inputfaktoren auf bestimmte Ergebnisgrößen untersucht. Dabei wird jeweils ein Parameter verändert, und es wird geprüft, ab welchem Zeitpunkt der Zielwert erstmalig unter- bzw. überschritten wird [SCH01]. Bei der simulationsbasierten Versuchsplanung erfolgt diese Analyse durch das Variieren der einzelnen logistischen bzw. technologischen Parameter und die Identifizierung der Einflüsse auf die logistischen Zielgrößen. Je größer der Unterschied zwischen den neuen Ergebnissen

und denen aus der Standardeinstellung der Parameter, desto bedeutender ist der veränderte Parameter.

Nachdem eine Vorauswahl der Parameter durchgeführt worden ist, wird der Versuchsplan in Schritt (2) erstellt. Zuerst wird die Anzahl der Einstellungen je Parameter festgelegt. In der Regel wird jeder Parameter mit zwei Einstellungen untersucht (vermeintlich guter und schlechter Wert). Diese können den Grenzwerten eines Toleranzfensters oder zwei unterschiedlichen Methoden entsprechen. Die Einstellung der Produktionslosgröße kann z. B. entweder nach einem der gängigen Verfahren berechnet werden oder einfach dem Bedarf einer vordefinierten Periode (Schicht oder Tag) entsprechen. Die zwei resultierenden Werte stellen in diesem Fall die zwei Einstellwerte dar. Dann wird die zu messende Zielgröße festgelegt. Abschließend werden die unterschiedlichen Versuchsreihen abgebildet und die Matrix des Versuchsplans erstellt. Ist die Anzahl der zu untersuchenden Parameter z. B. gleich 4, und jeder Parameter hat 2 unterschiedliche Einstellungen, so beträgt die Anzahl der Versuche 2^4 bzw. 16. Diese 16 Versuche resultieren aus allen möglichen Kombinationen der verschiedenen Parametereinstellungen.

Die einzelnen Versuche werden abschließend in Schritt (3) simulativ durchgeführt. Für jeden Versuch werden die Parameter im PPS-System gemäß dem Versuchsplan eingestellt, und die logistischen Zielgrößen werden erneut mit Hilfe der Simulation gemessen. Die Simulationsergebnisse werden evaluiert, und der Wert der Zielgröße wird errechnet. Sind sämtliche Versuche durchgeführt worden, so erfolgt deren Auswertung mit einer sogenannten Reaktionstabelle. Die genauen Rechenverfahren der Reaktionstabelle werden an dieser Stelle nicht detaillierter dargestellt. Es ist stattdessen auf die Literatur von Kleppmann [KLE03] und Klein [KLE04] zu verweisen. Ein ausführliches Beispiel wird in Kapitel 8.2 gezeigt. Aus der Reaktionstabelle werden die entscheidenden Parameter abgeleitet, die den größten Einfluss auf die Zielgröße haben.

Nach der Identifikation der entscheidenden Parameter erfolgt die „Parameteroptimierung“ in Schritt (4), während dessen die vermutlich besseren Einstellungen weiter verbessert werden. Hierfür werden weitere Versuche durchgeführt, in denen nur einer der entscheidenden Parameter schrittweise geändert wird. Die entsprechenden Simulationsläufe werden durchgeführt und ausgewertet. Die resultierenden Werte der Zielgröße werden abschließend in der Funktion des anzupassenden Parameters grafisch dargestellt, um seinen besten Wert abzuleiten.

Aus dem neuen Parameterwert können Anforderungen an die Technologie in Schritt (5) abgeleitet werden. Hierfür wird die in Abschnitt 5.1.3 erarbeitete Zusammenhangmatrix (Bild 5-13) als Hilfestellung genommen. Können die logistischen Anforderungen erfüllt werden und resultiert daraus eine neue Parametrierung der Technologie, so werden die neuen Einstellwerte auf ihre Wirksamkeit geprüft.

Die Ergebnisse aus Schritt (4) und (5) werden in Schritt (6) mit Hilfe der Materialflusssimulation auf ihre Wirksamkeit geprüft. Auch hier werden die Simulationsergebnisse mit der Monitoringkomponente hinsichtlich Erreichung der logistischen Ziele ausgewertet.

Erst wenn sich die Parameteranpassung positiv auf die Erreichung der logistischen Ziele auswirkt, werden die neuen Werte in Schritt (7) im PPS-System eingestellt.

7. Simulationsbasiertes Werkzeug zur logistischen Beherrschung neuer Technologien

7.1 Anforderungen

Um die entlang des Technologielebenszyklus notwendigen logistischen Aufgaben effizient durchzuführen, ist ein unterstützendes Werkzeug gefragt, welches die folgenden zwei Anforderungen erfüllen muss.

Zum einen muss das Werkzeug modular aufgebaut sein und verschiedene Komponenten zur Produktionsplanung und -steuerung, zum Monitoring und zur Simulation der inner- sowie überbetrieblichen Materialflüsse beinhalten. Diese einzelnen Bausteine müssen in einen Regelkreis integriert sein, um die Betriebs- bzw. Simulationsdaten kontinuierlich in der Monitoringkomponente auszuwerten und die Parameter des Planungs- und Steuerungsbausteins basierend auf den Ergebnissen anzupassen.

Zum anderen muss das Werkzeug ein Simulationsmodell beinhalten, welches die in Abschnitt 5.3.2 definierten Anforderungen erfüllt. Vor allem müssen mit dem Simulationsmodell alle drei Abstraktionsebenen von der Ressourcen- über die unternehmensinterne bis hin zur Lieferkettenebene modelliert und simuliert werden. Darüber hinaus muss das Simulationsmodell schnell anpassbar und veränderbar sein, um mögliche Szenarien zur Gestaltung von Prozess- und Lieferketten schnell und effizient zu simulieren.

Abstraktionsebene des Werkzeugs	Aufgaben entlang des Technologielebenszyklus
Lieferkettenebene	▪ Testen der Lieferfähigkeit neuer Lieferanten ▪ Gestaltung des Liefernetzwerks ▪ Validierung von Notfallstrategien
Unternehmensebene	▪ Validierung der PPS Methoden ▪ Gestaltung der Prozesskette ▪ Monitoring der logistischen Abläufe
Ressourcenebene	▪ Einstellung der technischen Parameter und Einbindung in die Prozesskette ▪ Beobachtung der Produktivität und Qualität

Bild 7-1: Anforderungen an das unterstützende Werkzeug

Bild 7-1 fasst die notwendigen Abstraktionsebenen des unterstützenden Werkzeugs sowie die logistischen Aufgaben zusammen, die mit Hilfe des Werkzeugs durchgeführt werden sollen.

Auf der Lieferkettenebene soll das Werkzeug die Ermittlung der logistischen Auswirkungen neuer Technologien auf Netzwerke unterstützen. Sind diese erkannt, so soll das Werkzeug dabei helfen, die vorhandenen Lieferketten neu zu gestalten. Dies beinhaltet die Lieferantenauswahl und -erprobung, die Neudimensionierung des Logistiknetzwerks sowie die Erarbeitung und Validierung von Notfallstrategien. Auf der Unternehmensebene soll das Werkzeug bei der Auswahl und Validierung der Methoden zur Produktionsplanung und -steuerung verwendet werden. Hierfür müssen verschiedene Verfahren schnell und effizient miteinander verglichen werden. Des Weiteren sollen die neu gestalteten innerbetrieblichen Prozessketten mit Hilfe desselben Werkzeugs strukturiert und dimensioniert werden. Dies betrifft bspw. die Anordnung und Verkettung der einzelnen Arbeitssysteme sowie die Größe der notwendigen Puffer- und Lagerflächen. Darüber hinaus soll das Werkzeug eine Monitoringkomponente vorsehen, um die logistischen Abläufe kontinuierlich zu überwachen und daraus abgeleitet die Planung anzupassen.

Auf der Ressourcenebene geht es hauptsächlich darum, die logistische Einbindung eines neuen Arbeitssystems in die vorhandene Prozesskette sicherzustellen. Hierfür sollen die Auswirkungen einer Änderung der technischen Parameter des Arbeitssystems auf die logistischen Abläufe identifiziert werden. Die Entwicklung der technischen Fortschritte, wie z. B. Verminderung der Ausschussquote oder Steigerung der technischen Verfügbarkeit, muss außerdem ständig verfolgt werden. Auf Basis dessen werden anschließend entsprechende Planparameter angepasst.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein solches Werkzeug entwickelt, welches im Folgenden detaillierter beschrieben wird.

7.2 Aufbau des Werkzeugs SiMPL

Für eine rechnergestützte Durchführung der verschiedenen logistischen Aufgaben entlang des Technologielebenszyklus wurde im Rahmen dieser Arbeit das in Bild 7-2 dargestellte simulationsbasierte Werkzeug „SiMPL“ (**Si**mulationsbasiertes Werkzeug zur **P**lanung, Steuerung und zum **M**onitoring von **L**ieferketten) entwickelt.

SiMPL ist modular aufgebaut und beinhaltet neben den Modulen zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) und zum Monitoring die drei im vorhergehen Kapitel erläuterten Simulationsmodule „Zulieferer“, „Produzent“ und „Kunde“. Eine Datenbank dient als Schnittstelle zwischen allen Modulen.

Das Modul „PPS“ übergibt die Kundenbestellungen bzw. -prognosen über die Schnittstelle Datenbank zum Simulationsmodul „Kunde“. Dieses generiert daraus, entsprechend dem Bestellverhalten des Kunden in der Vergangenheit, neue Kundenaufträge und schreibt diese in die Datenbank zurück. Anschließend erzeugt das planende Modul „PPS“ terminierte Arbeitsvorgangsreihenfolgen und schreibt Lieferabrufe an Rohstoffen in die Datenbank ein, die vom Simulationsmodul „Zulieferer“ ausgelesen und nach eingestelltem Lieferverhalten erfüllt werden.

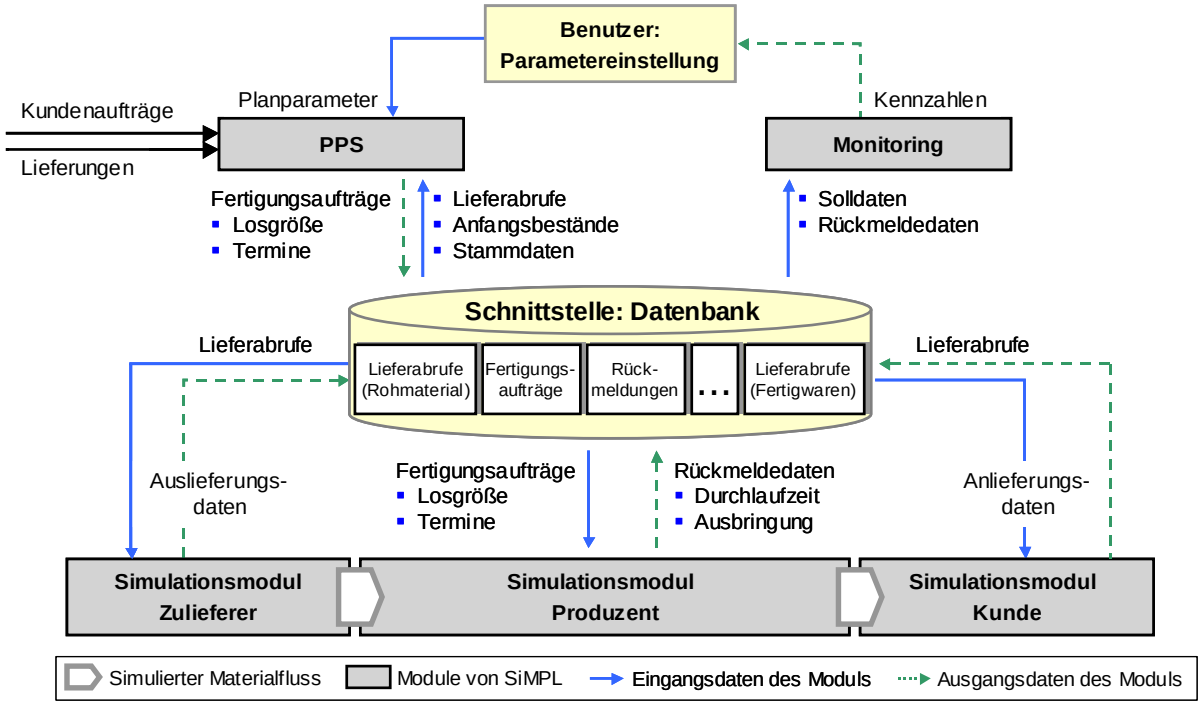


Bild 7-2: Architektur und Bausteine von SiMPL – Simulationsbasiertes Werkzeug zur Planung, Steuerung und zum Monitoring von Lieferketten

Das Simulationsmodul „Produzent“ liest daraufhin die Fertigungsaufträge ein, simuliert deren Durchführung und meldet Betriebsdaten zurück. Diese Rückmeldungen werden vom Modul „Monitoring“ ausgelesen, analysiert und zu Kennzahlen zur Auswertung der Logistikleistung und -kosten verdichtet. Anhand dieser Kennzahlen kann der Nutzer die Planparameter im PPS-Modul ändern. Zu allen Simulationsmodulen wurden Dialogfenster implementiert, um die Bedienbarkeit zu erleichtern und die Skalierbarkeit sowie Erweiterbarkeit sicherzustellen. Darüber hinaus ermöglichen die verschiedenen Module eine einfache Veränderung des Simulations-netzwerks und erlauben die Simulation von verschiedenen Fertigungsprinzipien. Dadurch, dass die Verbindungen zwischen den einzelnen Ressourcen automatisch aus den Arbeitsvorgangsfolgen abgeleitet werden, muss im Simulationsmodell kein bestimmter Materialfluss vordefiniert werden. Die Reihenfolgen der Arbeitsvorgänge werden aus dem Arbeitsplan ausgelesen. Die Transportzeiten jeder möglichen Verbindung, z. B. zwischen den jeweiligen Lieferanten und den Abnehmern, sind in einer Transportmatrix gespeichert.

Die Simulationsmodelle werden automatisch aus dem Datenbestand generiert. Dies ermöglicht somit eine einfache und schnelle Änderung oder Anpassung der inner- und der überbetrieblichen logistischen Abläufe. Im Folgenden werden die einzelnen Module von SiMPL genauer beschrieben.

7.2.1 Technische Realisierung

Bei der Implementierung des simulationsbasierten Werkzeugs SiMPL wurde auf die Erfüllung der in Abschnitt 7.1 beschriebenen Anforderungen abgezielt. Neben der Befriedigung funktionaler und ergonomischer Ansprüche wurde ein Simulationsmodell an-

gestrebt, das auch in anderen Lieferkettenstrukturen eingesetzt werden kann. Zum Zwecke der Erfüllung ergonomischer Ansprüche wurden verschiedene Dialogfenster zur Komponentenbedienung entwickelt und Hintergrundbilder zur besseren Visualisierung von Prozess- und Lieferketten hinterlegt.

Beim konventionellen Aufbau von Simulationsmodellen wird zuerst ein leeres Blatt im Simulationsprogramm, wie z. B. Wittness oder eM-Plant, geöffnet. Dann werden einzelne Elemente und Module aus der im Programm vorhandenen Klassenbibliothek durch „drag and drop“ instanziiert. Durch die Verbindung der verschiedenen Elemente mit Kanten und Knoten sowie durch Definition verschiedener Abhängigkeiten werden Prozess- bzw. Lieferketten modelliert. Anschließend werden Methoden in der eigenen Skriptsprache des Simulationsprogramms geschrieben, welche die Planungs- und Steuerungslogik widerspiegeln. Solche Simulationsmodelle sind in den meisten Fällen auf ein bestimmtes Problem fokussiert und sind somit „Einweglösungen“. Ändert sich die Gestaltung der Prozess- bzw. der Lieferkette, muss i. d. R. das ganze Modell neu entwickelt werden.

Weil die frühen Phasen des Technologielebenszyklus durch große Ungewissheiten geprägt sind, müssen verschiedene Szenarien für die Gestaltung der über- und innerbetrieblichen Prozesskette vorbereitet werden. Um diese Szenarien schnell und effizient modellieren und simulieren zu können, bedarf es eines flexiblen und übertragbaren Simulationsmodells. Dadurch, dass SiMPL automatisch aus dem Datenbestand generiert wird, können die Liefer- und Prozessketten schnell und leicht durch Anpassung der entsprechenden Tabellen in der Datenbank geändert werden. Bild 7-3 zeigt die Schritte zum Aufbau des Simulationswerkzeugs aus einem vorhandenen Datenbestand.

Die zwei wesentlichen Ansätze zur automatischen Generierung von SiMPL sind eine auf Basis von MS-Access entwickelte Datenbank sowie eine in der Skriptsprache „SimTalk“ des Simulationsprogramms eM-Plant geschriebene Ausführungsmethode. In Schritt 1 wird diese Methode durch Anklicken der Schaltfläche „Ausführen“ gestartet. Anschließend wird ein Simulationsmodell gewählt. Ist kein Modell vorhanden, so muss ein neues aufgebaut werden. Hierfür wird die Schaltfläche „Neu“ im Dialogfenster „Modell wählen“ angeklickt.

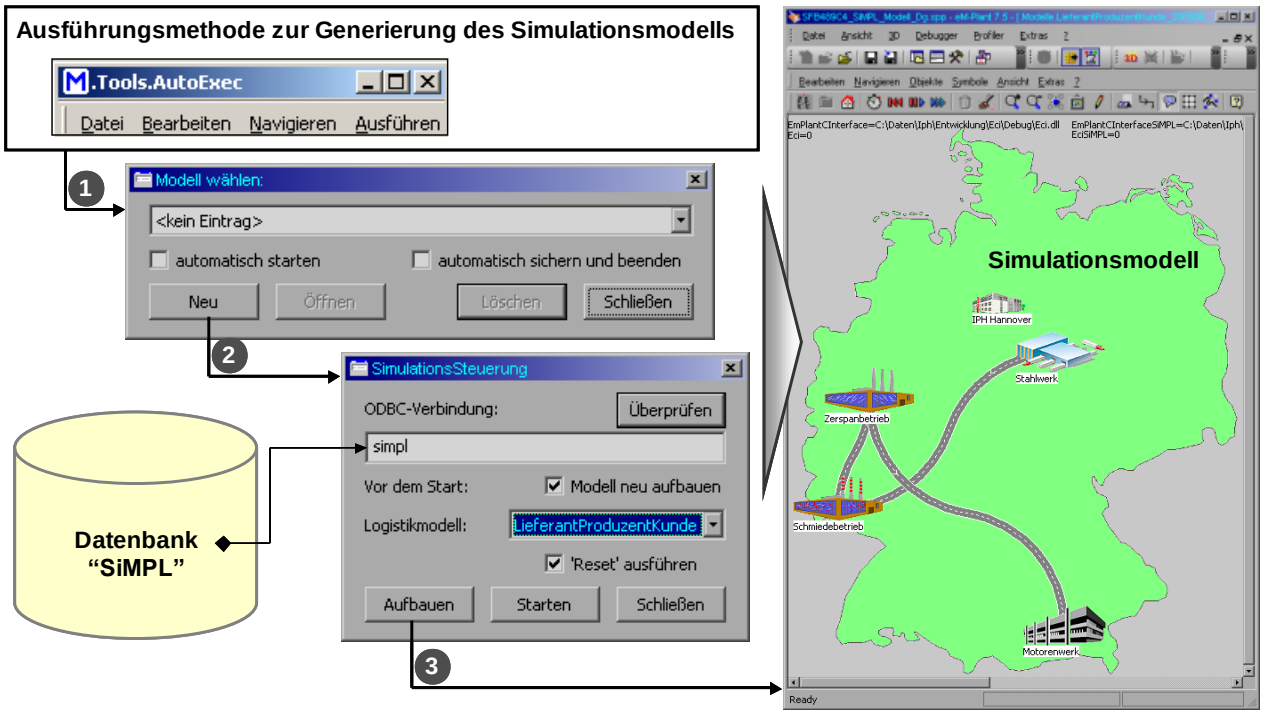


Bild 7-3: Automatische Generierung des Simulationsmodells aus dem Datenbestand

In Schritt 2 ist zu definieren, aus welchem Datenbestand das Modell zu erzeugen ist. In das Textfeld des Dialogfensters „SimulationsSteuerung“ wird der Name der entsprechenden Datenbank eingegeben. Dann wird ein Logistikmodell selektiert. Es ist möglich, dass in einer Datenbank unterschiedliche Simulationsmodelle enthalten sind. Diese Modelle werden zur Auswahl angeboten. Abschließend erfolgt in Schritt 3 die Generierung des Simulationsmodells, indem die Schaltfläche „Aufbauen“ gedrückt wird. Das Bild auf der rechten Seite der Grafik zeigt die Simulationsabstraktionsebene „Lieferkette“. Zum Zwecke einer ergonomischen Gestaltung des Simulationsmodells werden die einzelnen Glieder der Lieferkette auf der entsprechenden Landkarte platziert. Das präsentierte Beispiel zeigt eine Lieferkette mit vier unterschiedlichen Unternehmen in Deutschland.

7.2.2 Datenstruktur von SiMPL

Die Basis für die automatische Generierung von SiMPL ist die objektorientierte Modellierung sämtlicher logistischer Abläufe in einer Datenbank. Die auf Basis von MS-Access entwickelte Datenbank dient des Weiteren als Schnittstelle zwischen allen Komponenten von SiMPL. Neben den Stammdaten werden Soll-, Plan- und Ist-Daten in der Datenbank verdichtet. Diese Daten werden in Tabellen hinterlegt, deren Verknüpfungen im sogenannten Klassendiagramm sichtbar werden. Die entwickelte Datenbank beinhaltet 24 Tabellen und insgesamt 49 Verknüpfungen. Eine grafische Abbildung des gesamten Klassendiagramms ist daher nur auf Kosten der Übersichtlichkeit möglich. Deshalb wird nur ein Ausschnitt aus der Datenstruktur grafisch dargestellt. Bild 7-4 zeigt die relevanten Tabellen für die Modellierung der Liefer- und Prozesskette.

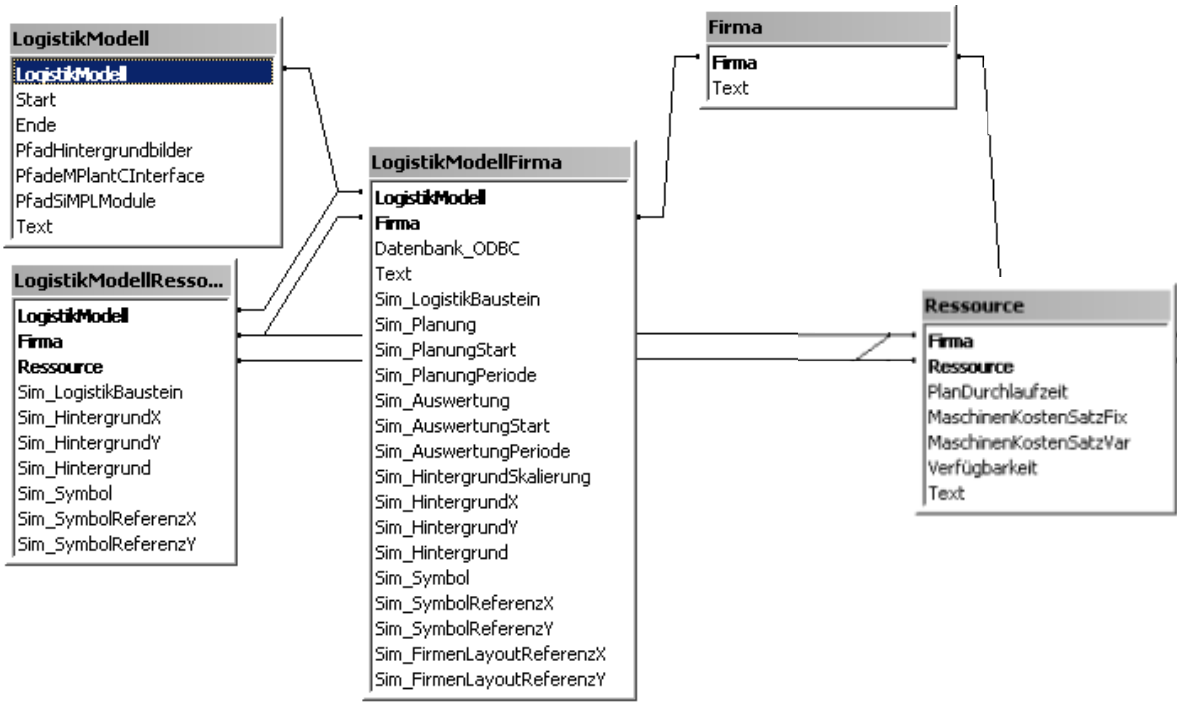


Bild 7-4: Ausschnitt aus der Datenstruktur von SiMPL

Jede Tabelle wird durch ihren Namen und ihre Attribute dargestellt, die den unterschiedlichen Tabellenzeilen entsprechen. Die Tabelle *LogistikModell* beinhaltet Daten über die verschiedenen zu simulierenden Modelle. Diese Modelle können zum Beispiel unterschiedlichen Netzwerkszenarien mit unterschiedlichen Lieferkettengliedern entsprechen. Die Tabelle *LogistikModellFirma* beinhaltet alle Daten über Firmen, die dem jeweiligen Modell zugeordnet sind. Zu diesen Daten gehört u. a. der Pfad des Planungstools.

Im Gegensatz zur konventionellen Simulation werden die Planungs- und Steuerungsmethoden nicht im Simulationsmodell „hart verdrahtet“ implementiert, es wird stattdessen auf das entsprechende Planungstool zugegriffen. Dadurch wird es ermöglicht, schnell und effizient das Planungsverfahren zu ändern, ohne neue Methoden im Simulationsmodell schreiben zu müssen. Ein weiterer Vorteil dieser Modellierung ist, dass jede Firma mit einem unterschiedlichen Tool und Verfahren planen kann, was die Realität eher abbildet. In der Tabelle *LogistikModellRessource* sind die unterschiedlichen Arbeitssysteme jedes Unternehmens aufgelistet sowie ihre Koordinaten im Unternehmen gemäß dem Fabriklayout. Dadurch wird die innerbetriebliche Prozesskette modelliert. Die Tabelle Ressource beinhaltet weitere Daten über die einzelnen Arbeitssysteme, wie z. B. Plandurchlaufzeit oder Maschinenkostensatz.

Zusätzlich zu den in Bild 7-4 dargestellten Tabellen beinhaltet die Datenbank sämtliche Artikelstammdaten, Daten über die Schichtmodelle der einzelnen Firmen sowie Daten über die bestehenden Rahmenverträge zwischen den modellierten Unternehmen.

7.3 Planungs- und Monitoringkomponente

Die Methoden für die Produktionsplanung und -steuerung wurden objektorientiert mit der Programmiersprache C++ in einem prototypischen Tool implementiert. Das Tool basiert auf einer Klassenstruktur, die wiederum auf der Datenbank von SiMPL basiert. Die objektorientierte Implementierung erhöht die Tool-Flexibilität und ermöglicht das schnelle und effiziente Ändern der Algorithmen. Somit lassen sich Planungs- oder Steuerungsmethoden relativ einfach durch modifizierte Alternativen ersetzen, und das Tool kann beliebig um weitere Methoden und Funktionalitäten erweitert werden. Das PPS-Tool wird im System SiMPL zu vordefinierten Zeitpunkten durch das Simulationsmodell aufgerufen, greift auf die Datenbank zu, um die benötigten Daten für die Planung auszulesen, und schreibt die Planungsergebnisse in Form terminierter Fertigungsaufträge zurück.

Die Monitoringkomponente liest aus der Datenbank die Plan- sowie Ist-Daten und verdichtet sie in Kennzahlen und Grafiken. Die errechneten Kennzahlen werden in entsprechenden Durchlaufdiagrammen (vgl. 5.1.1) sowie Produktionskennlinien (vgl. 3.3) grafisch dargestellt. Sie dienen zum einen als Warnsystem, für den Fall, dass die Ist- von den Soll-Werten abweichen. Zum anderen liefern sie dem PPS-Modul Planparameter, wie z. B. die aktuellen Ausschussquoten der einzelnen Arbeitssysteme.

7.4 Ausführungskomponenten

7.4.1 Modul Zulieferer

Für die Modellierung des Lieferverhaltens (vgl. Abschnitt 6.1.2.1) wurde das in Bild 7-5 dargestellte Dialogfenster entwickelt, um die relevanten Modellierungsparameter einzustellen.

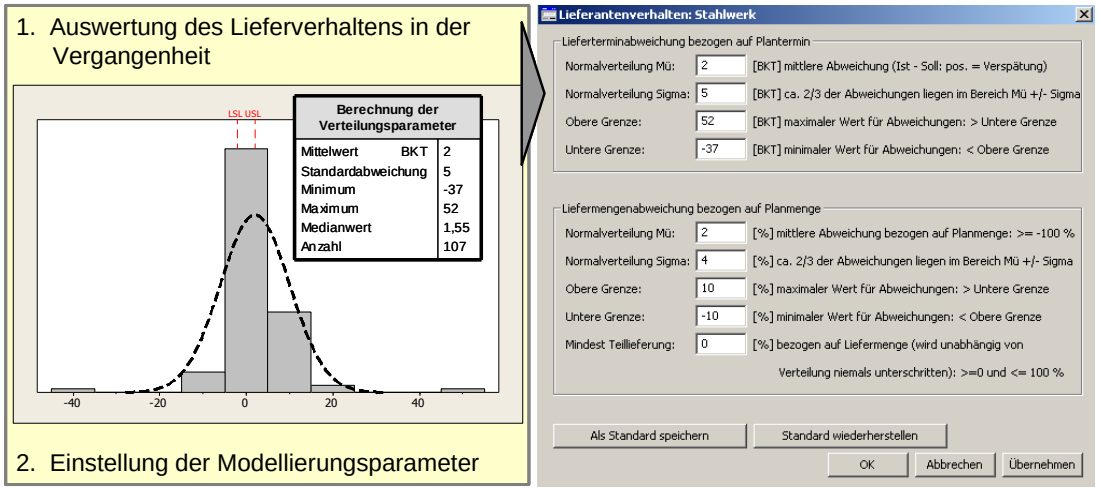


Bild 7-5: Dialogfenster zur Modellierung des Lieferantenverhaltens

Gemäß den Auswertungsergebnissen des Lieferverhaltens in der Vergangenheit werden die Parameter zur Modellierung der Liefertermin- sowie -mengenabweichung ein-

gestellt. Das dargestellte Beispiel zeigt einen Lieferanten, welcher in der betrachteten Periode durchschnittlich 2 Tage zu spät geliefert hat, mit einer Standardabweichung von 5 Tagen.

Die Lieferterminabweichung schwankte dabei zwischen 37 Tagen zu früh und 52 Tagen zu spät. Diese gemessenen Werte werden im Dialogfenster auf der rechten Seite des Bilds in die entsprechenden Eingabefelder eingestellt.

Analog zur Modellierung des Lieferverhaltens bezüglich des Liefertermins wird die Liefermengenabweichung ausgewertet und modelliert.

7.4.2 Produzent

Das Modul „Produzent“ bildet die innerbetrieblichen Produktionsabläufe eines produzierenden Unternehmens ab und wird, gemäß den in der Datenbank eingestellten technischen und logistischen Parametern, automatisch aufgebaut. Bild 7-6 zeigt das Beispiel eines modellierten Schmiedeprozesses.

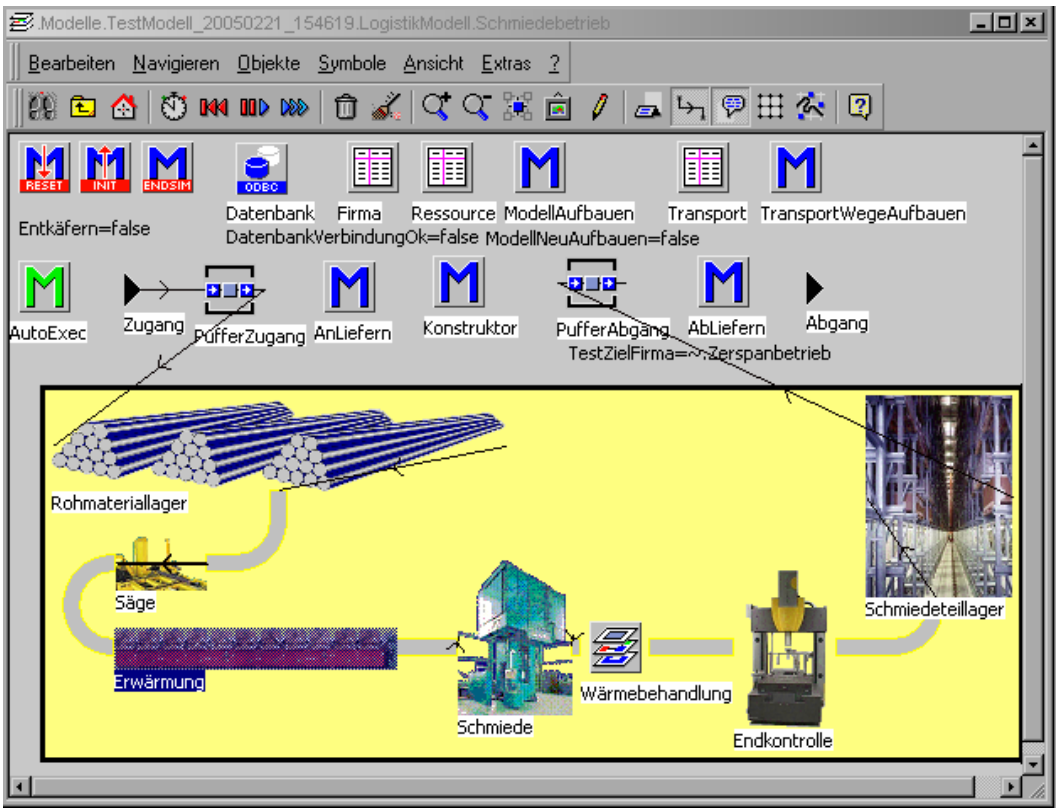


Bild 7-6: Simulationsmodell einer Schmiedeprozesskette

Anstelle der konventionellen Bausteine des Simulationsprogramms werden reale Bilder der Arbeitssysteme verwendet, um eine ergonomische Benutzeroberfläche zu realisieren. Die zu modellierende Produktionsstätte wird in einem kartesischen Koordinatensystem dargestellt, und die entsprechenden Positionen der einzelnen Arbeitsplätze werden in der Tabelle „*Ressource*“ hinterlegt. Die weiteren relevanten Tabellen zur Modellierung eines produzierenden Unternehmens sind „*LogistikModellRessource*“ und

„*Arbeitsgang*“. Die Tabelle „*LogistikModellRessource*“ listet die einzelnen Maschinen auf, die zur Produktionsprozesskette gehören. Die Reihenfolge der einzelnen Prozessschritte wird dagegen in der Tabelle „*Arbeitsgang*“ definiert. Wird eine Maschine geändert oder die Arbeitsvorgangsfolge modifiziert, so soll die entsprechende Tabelle angepasst werden. Das Simulationsmodell wird anschließend automatisch aktualisiert.

Die relevanten Eingangsgrößen dieses Moduls sind zum einen die vom PPS-System generierten Fertigungsaufträge und zum anderen die Lieferungen vom direkten Lieferanten.

7.4.3 Kunde

In Analogie zur Lieferantenmodellierung wurde ein Dialogfenster entwickelt (Bild 7-7), um die Modellierungsparameter entsprechend Abschnitt 6.1.2.3 einzustellen und somit das Bestellverhalten des Kunden abzubilden.

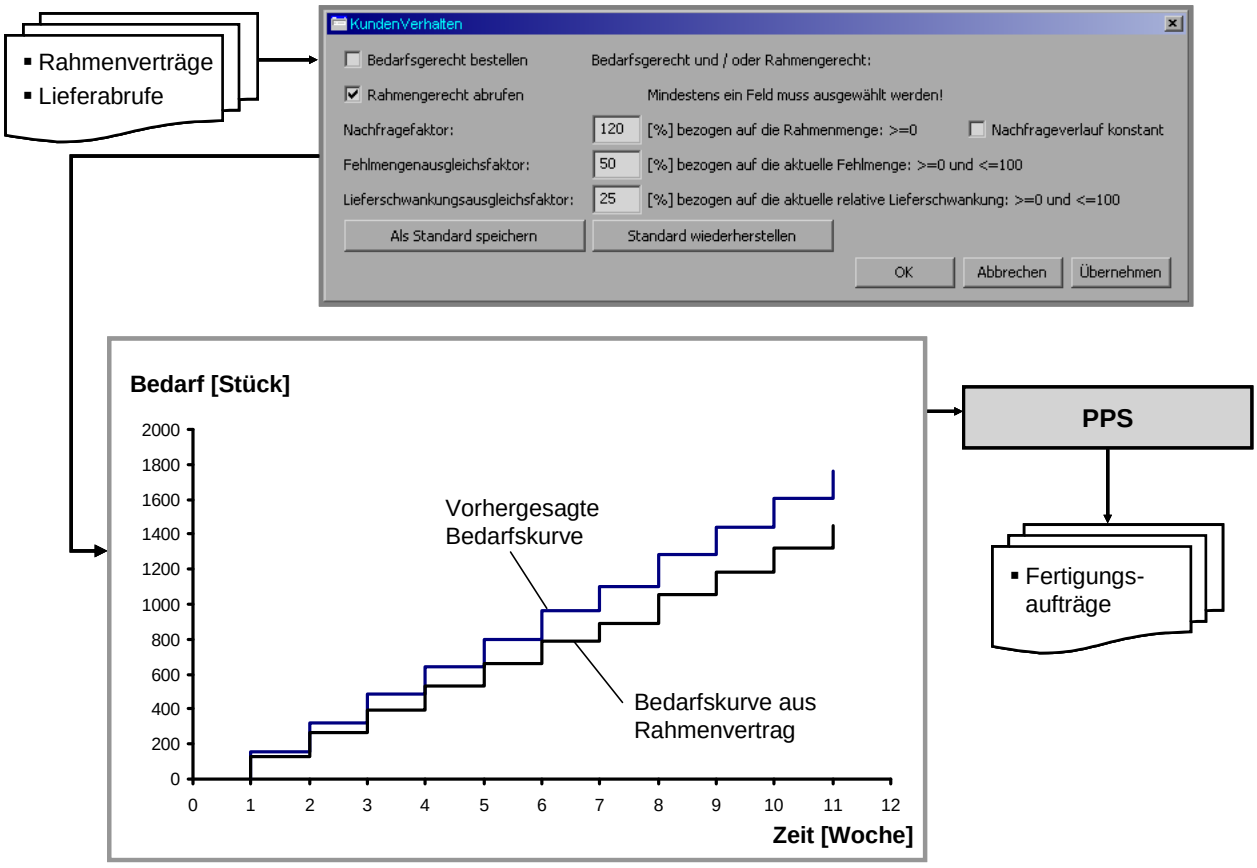


Bild 7-7: Modellierung des Kundenverhaltens

Bild 7-7 zeigt eine beispielhafte Kundenmodellierung. Die Modellierungsparameter werden basierend auf Vergangenheitsauswertungen sowie auf dem Erfahrungswissen des Planers eingestellt. In dem dargestellten Beispiel wird eine Erhöhung der Marktnachfrage um 20 % erwartet, deshalb wurde der Nachfragefaktor gleich 120 % gesetzt. Der Fehlmengenausgleichsfaktor **α** und der Lieferschwankungsausgleichsfaktor **β** wurden

auf 50 % bzw. 25 % gesetzt. Das Simulationsmodul „Kunde“ generiert daraus wöchentliche Lieferabrufe, die in die Datenbank von SiMPL eingeschrieben werden. Die Bestellfrequenz wird in der Tabelle *„RahmenTermin“* der gleichen Datenbank definiert.

Wie im gleichen Bild dargestellt, sind die vom Simulationsmodul vorhergesagten Bedarfe höher als die aus dem Rahmenvertrag. Das PPS-Modul liest diese vorhergesagten Mengen aus der Datenbank zum Zwecke der Fertigungsplanung aus.

8. Validierungsbeispiel

Die in Kap. 6 erarbeiteten Methoden zur logistischen Beherrschung von Prozessketten bei einer Technologieänderung wurden am Beispiel der Ablösung des konventionellen Gesenkschmiedens durch das Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung erprobt. Dabei wird das Schmieden von Kurbelwellen betrachtet.

Nach einer Beschreibung der neuen Technologie (Abschnitt 8.1) wird die daraus resultierende Prozesskette gestaltet (Abschnitt 8.2.1.2), und ihre Nachhaltigkeit in realitätsnaher Umgebung wird anschließend validiert (Abschnitt 8.2.1.4). Hierfür werden mit dem entwickelten Werkzeug SiMPL unterschiedliche Prozesskettenvarianten und Lieferkettenszenarien modelliert. In Abschnitt 8.2.2 wird abschließend die Methode zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung auf ihre Wirksamkeit geprüft.

Bild 8-1 stellt vereinfacht die Zusammenhänge zwischen den zu simulierenden Varianten und Szenarien dar.

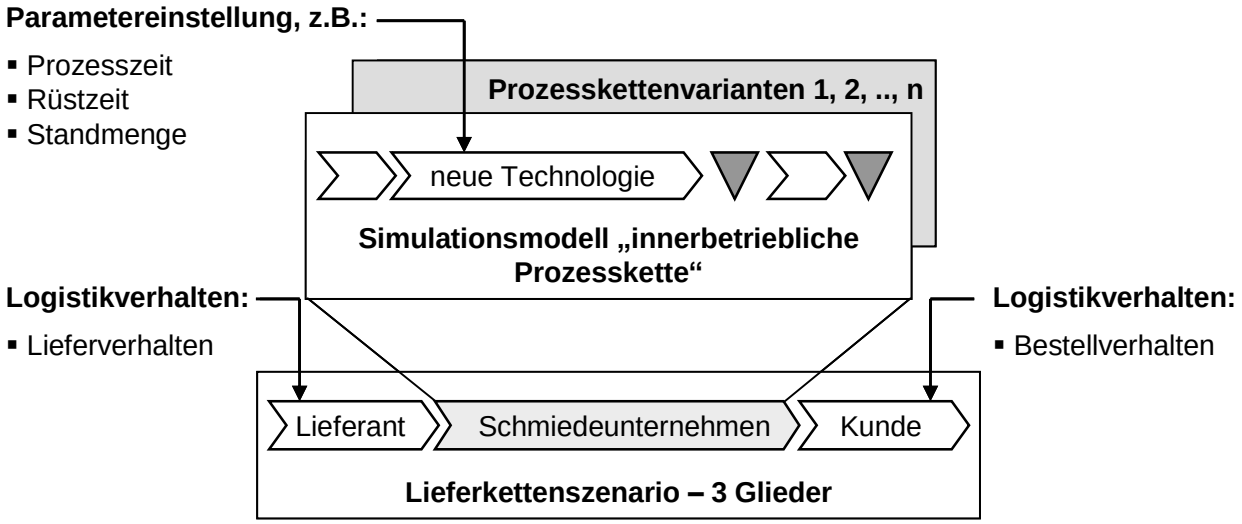


Bild 8-1: Zusammenhang zwischen Prozesskettenvarianten und Lieferkettenszenarien

Aus unterschiedlicher Parametrierung der Technologie entstehen unterschiedliche *Prozesskettenvarianten* zur Gestaltung der innerbetrieblichen Prozesskette (vgl. 6.1.1). Um die Nachhaltigkeit der Prozesskettenvarianten zu erproben, werden unterschiedliche *Logistikvarianten* simuliert, die unterschiedliche Bestell- bzw. Lieferverhalten des Kunden und Lieferanten modellieren. Die *Lieferkettenszenarien* dagegen, modellieren die überbetriebliche Lieferkette. Sie stellen übergreifend Prozesskettenvarianten sowie das Logistikverhalten dar.

8.1 Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 489 „Prozesskette zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile“ wurden die Grundlagen des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung erforscht und entsprechende Werkzeu-

ge entwickelt. Diese neue Technologie soll mit den weiteren Prozesselementen der Schmiedeprozesskette logistisch so verknüpft werden, dass sie effizient gestaltet wird.

Im Mittelpunkt der Einführung des Präzisionsschmiedens steht neben der Materialersparnis und der Erreichung besserer Bauteilqualität die drastische Verkürzung der Prozesskette, die unter anderem dank der Integration der Wärmebehandlung in den Schmiedeprozess und der Substitution der spanenden Weichbearbeitung durch die genaue Formgebung erreicht wird.

Bild 8-2 zeigt die einzelnen Prozesselemente der konventionellen Schmiedeprozesskette.

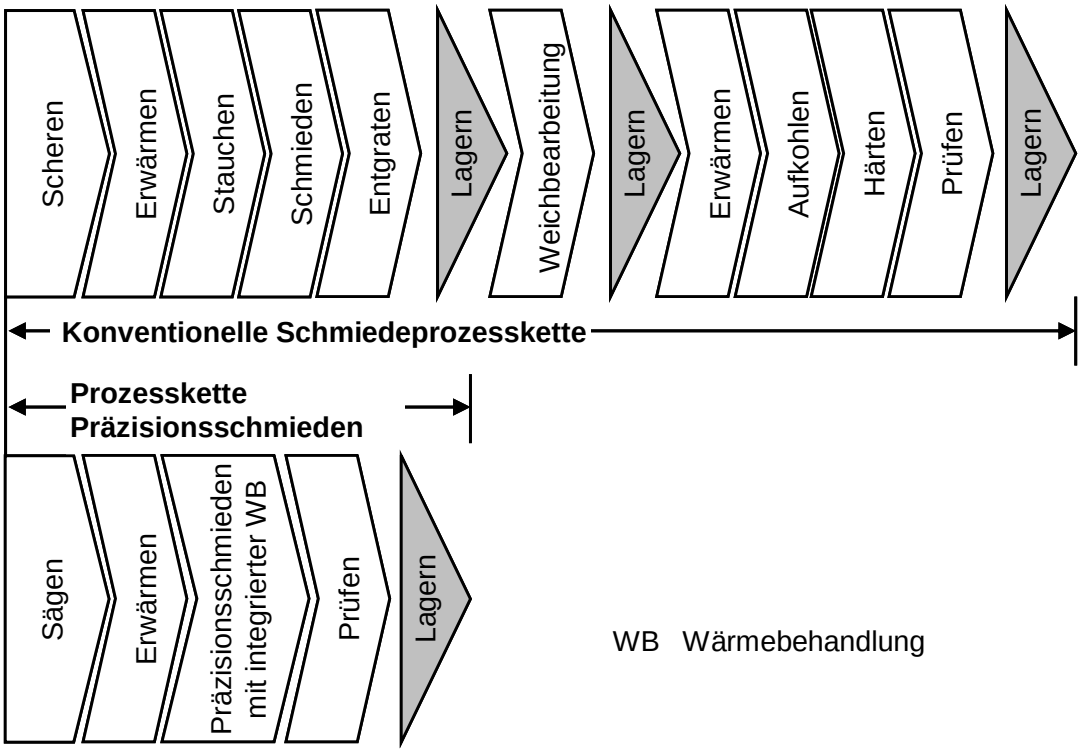


Bild 8-2: Verkürzungspotenzial der Prozesskette zum Präzisionsschmieden gegenüber der konventionellen Schmiedeprozesskette

Bei der logistischen Gestaltung der Prozesskette zum Präzisionsschmieden stellen sich folgende Fragen:

- Wie werden die neuen Prozesselemente (Präzisionsschmieden und integrierte Wärmebehandlung) in eine bestehende Prozesskette integriert?
- Welche Einflüsse hat das Präzisionsschmieden auf die Gestaltung der Lieferkette und der innerbetrieblichen Prozessabläufe?
- Welche logistischen Anforderungen muss das Präzisionsschmieden erfüllen?

Diese Fragen sollen während der Entstehungsphase des Technologielebenszyklus beantwortet werden, um die mit dem Präzisionsschmieden einhergehenden logistischen Potenziale auszuschöpfen (8.2.1).

Nach der Gestaltung der aus der Technologieänderung resultierenden Schmiedeprozesskette ergibt sich die Frage, wie die Produktion geplant und gesteuert werden soll, um die logistischen Ziele schon während der Wachstumsphase zu erfüllen (8.2.2).

8.2 Validierung der Methoden und Ergebnisdiskussion

In diesem Abschnitt werden die oben geschilderten Fragestellungen mit Hilfe der in Kapitel 6 erarbeiteten Methoden und Instrumente behandelt. Die Validierung zielt darauf ab, die Eignung und Anwendbarkeit

- des entwickelten Simulationswerkzeugs SiMPL zur Gestaltung von Prozess- und Lieferketten sowie
- der Methode zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung

nachzuweisen.

8.2.1 Anwendung von SiMPL zur Gestaltung der Liefer- und Prozesskette zum Präzisionsschmieden

Das Technologiemanagement beginnt mit der Grundlagenforschung, in der für ein vordefiniertes Problem die „Forschungsrichtung“ bestimmt wird [BUL02]. Im Fall des betrachteten Beispiels handelt es sich um die Ablösung des konventionellen Gesenkschmiedens durch eine hinsichtlich der Materialnutzung wirtschaftlichere und hinsichtlich der Bauteilqualität genauere Schmiedetechnologie. Hierfür wurden in der frühen Phase des Technologielebenszyklus unterschiedliche Technologien erforscht, bevor die Entscheidung für das Präzisionsschmieden mit der integrierten Wärmebehandlung fiel.

Anschließend folgte die Entstehungsphase, in der verschiedene Szenarien zum Präzisionsschmieden erarbeitet wurden. Die unterschiedlichen Szenarien betrafen u. a. die Auslegung der Stadienfolgen und der Umformschritte sowie die Definition der Umformtemperatur.

Um die Zusammenhänge zwischen dem Präzisionsschmieden und dessen logistischer Gestaltung zu ermitteln, müssen zuerst die Auswirkungen dieser neuen Technologie auf die bestehende innerbetriebliche Prozesskette sowie die überbetriebliche Lieferkette von Schmiedeunternehmen identifiziert werden.

8.2.1.1 Ermittlung der Auswirkungen des Präzisionsschmiedens auf die Logistik

Zusätzlich zu den Einflüssen des Präzisionsschmiedens auf die innerbetrieblichen Produktionsprozesse (vgl. Abschnitt 5.2) wirkt sich diese Technologieänderung auf die überbetriebliche Lieferkette aus.

Dadurch, dass die neue Technologie neben einer Eliminierung der Weichbearbeitung der Bauteile eine integrierte Wärmebehandlung vorsieht, ist der Einsatz von Vergütungsstählen (42CrMo4) oder von Ausscheidungshärtenden Ferritisch-Perlitischen (AFP) Stählen (wie z. B. cdpSo38 oder cdpSo40) anstelle von Einsatzstählen zwingend erforderlich.

Die relativ neue Stahlgruppe der AFP-Stähle muss im Allgemeinen in größeren Tonnagen bestellt werden und hat in der Regel längere Wiederbeschaffungszeiten als die herkömmlichen Einsatzstähle. Dies wirkt sich zum einen auf die Parametrierung der PPS-Systeme aus und beeinflusst zum anderen die Dimensionierung der Lagerbestände in der gesamten Lieferkette. In Abhängigkeit von der Wiederbeschaffungszeit lässt sich nämlich sowohl der Sicherheitsbestand in den Wareneingangslagern als auch der Meldebestand zur Wiederbestellung der Primärbedarfe ermitteln [DIT03]. Letzterer wirkt als Bestellauslöser und ist somit ein sehr bedeutender Dispositionsparameter.

Ferner hat die Wiederbeschaffungszeit entsprechend ihrem Verhältnis zur Lieferzeit einen direkten Einfluss auf die Strategie zur Programmplanung [DIT03]. Bei den meisten Schmiedeunternehmen ist die dem Kunden gegenüber zugesagte Lieferzeit kürzer als die Wiederbeschaffungszeit von Rohstoffen. Dies erzwingt eine Vorplanung. In einem solchen Fall müssen sowohl die Rohstoffe als auch die Enderzeugnisse vorgeplant bzw. vorproduziert und auf Lager gehalten werden, was zu einer hohen Kapitalbindung führt. Dadurch, dass die Wiederbeschaffungszeit hier länger wird, steigen automatisch die Lagerhaltungs- und Kapitalbindungskosten. Dies erfordert eine neue Dimensionierung der Lieferkette.

Des Weiteren ist zu überprüfen, ob die aktuellen Lieferanten die neuen Rohstoffe produzieren und somit ausliefern können. Ein wichtiger Aspekt dabei ist die Überprüfung, ob der Lieferant die bisherigen logistischen Anforderungen trotz neuer Werkstoffe im gleichen Maße erfüllen kann. Mit logistischen Anforderungen sind hierbei die Lieferzuverlässigkeit hinsichtlich Menge und Termin gemeint. Mit dem in Kapitel 7 präsentierten simulationsbasierten Werkzeug SiMPL können verschiedene Logistikverhaltensweisen simuliert werden, um die Lieferfähigkeit des Lieferanten zu überprüfen. Erfüllt er die Anforderungen nicht, so werden in dieser frühen Phase des Technologielebenszyklus alternative Lieferanten gesucht.

Als Folge neuer Werkstoffe kann eine innovative Technologie neue Betriebsmittel erfordern. Im Fall des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung ist dies allerdings nicht der Fall.

Eine weitere Auswirkung des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung auf die Lieferkette von Schmiedeunternehmen ergibt sich aus den kürzeren Taktzeiten, die mit der neuen Technologie erreicht werden können. Möchte ein Schmiedeunternehmen das daraus resultierende Potenzial zur Erhöhung der jährlichen Ausbringung nutzen, so muss die Lieferfähigkeit der Lieferanten in diesem Fall überprüft werden. Auch hierfür wird das simulationsbasierte Werkzeug SiMPL verwendet, mit dessen Hilfe die Grenzkapazitäten der Lieferanten ermittelt werden können.

8.2.1.2 Neugestaltung der Schmiedeprozesskette

Um praxisnahe Kenntnisse für eine effiziente Gestaltung der schmiedetechnischen Prozesskette zu gewinnen, wurden die Fertigungsprozesse von drei unterschiedlichen Schmiedeunternehmen analysiert. Es wurde dabei hauptsächlich das Schmieden von Langteilen wie z. B. Pkw- und Lkw-Kurbelwellen oder Vorder- bzw. Hinterachsen untersucht. Bild 8-3 zeigt den Materialfluss in den untersuchten Unternehmen.

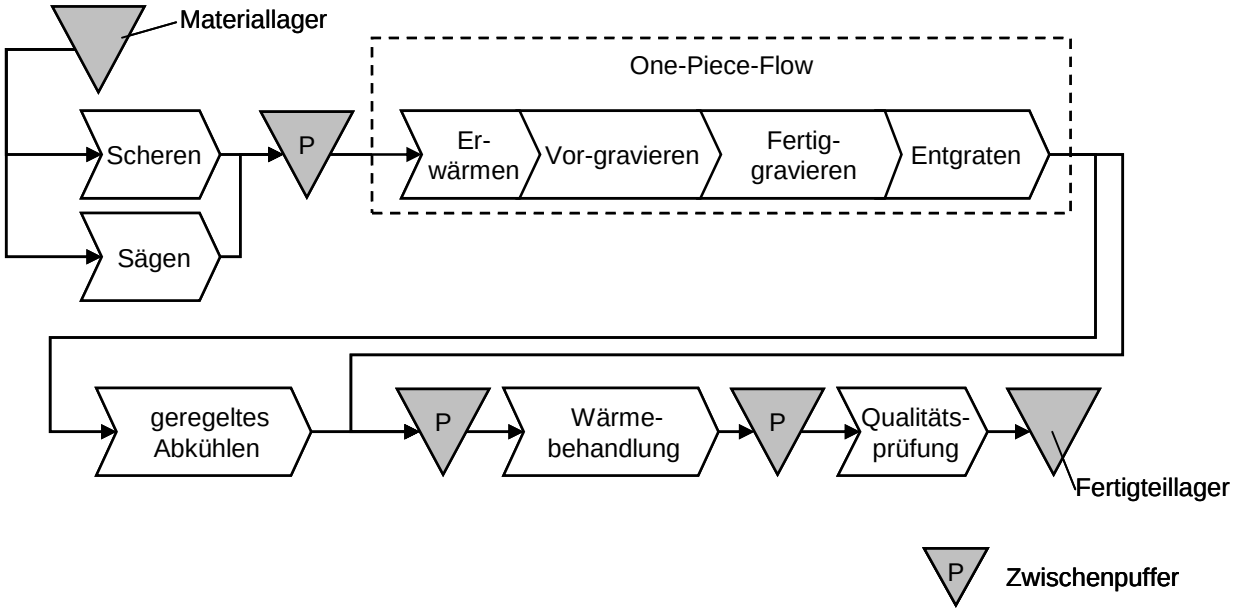


Bild 8-3: Schmiedeprozesskette in den untersuchten Schmiedeunternehmen

Allgemein war der Materialfluss durch einen linearen Charakter gekennzeichnet. Die wenigen vorhandenen Verzweigungen stellten alternative Materialflüsse dar, wie zum Beispiel das Scheren und Sägen. Die Prozesse des Erwärmens, Vorgravierens, Fertiggravierens und Entgratens waren miteinander materialflusstechnisch verbunden, und es fand ein stückweiser Transport der Teile statt (One-Piece-Flow). In allen anderen Teilen der Prozesskette wurden Lose oder Teillose transportiert. Deshalb war der Materialfluss durch Zwischenlagerung und Pufferung entkoppelt. An den Umformprozess schloss sich in einigen Fällen eine integrierte Wärmebehandlung in Form eines geregelten Abkühlens an, in den meisten Fällen erfolgte später eine gesonderte Wärmebehandlung in Öfen. Die Teile wurden anschließend geprüft und gelangten, nachdem sie zum Teil eine spanende Behandlung erfahren haben, in das Versandlager. Das zugrunde liegende Fertigungsprinzip war somit eine Mischung von Linien- bzw. Fließfertigung mit Elementen der Werkstattfertigung.

Das Best Practice Beispiel aus den untersuchten Schmiedebetrieben stellt die vollautomatisierte Schmiedelinie für Kurbelwellen der Firma ThyssenKrupp dar, die vom Sägen der Stahlzuschnitte bis zur 100-%-Prüfung der versandfertigen Kurbelwellen fest verkettet ist. Mit einer Taktzeit bis zu 7,5 Sekunden und einer Durchlaufzeit der Kurbelwelle vom Ausgangsmaterial bis in den Kundenbehälter von 4,5 Stunden erreicht die seit 2002 eingesetzte neue Produktionslinie eine jährliche Ausbrinung von über zwei Millionen Kurbelwellen, was mehr als die doppelte Kapazität einer vergleichbaren herkömmlichen Linie ist [KOR02]. Nach Entnahme des Materials aus dem Rohmaterial-Lager wird das Stangenmaterial durch Hochgeschwindigkeitssägen getrennt. Die nachfolgenden Prozesse des Erwärmens, des Diagonalstauchens, der Vor- und Feingravur, des Abgratens und des Kalibrierens sind dabei einheitlich getaktet. Das Einlegen in die Presse erfolgt dabei zum Teil manuell, meistens jedoch mit einem Roboter. Die Taktzeiten der Schmiedeaggregate liegen zwischen 8 und 15 Sekunden. Im Anschluss an das Umformen erfolgt ein definiertes Abkühlen bei Umgebungstemperatur auf einer

Förderstrecke in ca. vier Stunden. Daran angeschlossen ist eine Rissprüfung und eine optische Maßprüfung. Nach Beendigung der Prüfung werden die geschmiedeten Teile versandfertig in einem Auslieferungslager eingelagert.

Diese neue Schmiedelinie zeigt, dass es durchaus möglich ist, eine getaktete Fertigung von Kurbelwellen nach dem One-Piece-Flow zu gestalten. Im Rahmen dieser Arbeit wurde dies bei der Gestaltung der schmiedetechnischen Prozesskette als Ziel gesetzt. Ein Erfolgsfaktor bei der Realisierung der verketteten Schmiedelinie der Firma ThyssenKrupp war die sehr geringe Umrüstzeit. Mit Hilfe eines Werkzeugwechselsystems kann eine Umrüstung der Schmiedepresse in ca. 15 Minuten durchgeführt werden [KOR02]. Zusätzlich zur kurzen Umrüstzeit trägt die hohe Werkzeugstandmenge dazu bei, weniger Umrüstvorgänge und somit weniger Maschinenstillstände zu erreichen.

Basierend auf diesen Kenntnissen wird die im Rahmen dieser Arbeit betrachtete Prozesskette strukturiert und dimensioniert.

In Abhängigkeit von der technischen Auslegung der neuen Technologie soll in diesem Schritt die innerbetriebliche Prozesskette gestaltet und dimensioniert werden. Ergebnisse aus dem bereits erwähnten Sonderforschungsbereich SFB489 ergaben, dass das Präzisionsschmieden von Vier-Zylinder-Kurbelwellen 15 Sekunden dauert. Um eine möglichst wirtschaftliche Schmiedeprozesskette zu erreichen, wurde bei der Prozesskettengestaltung das Prozesselement „Präzisionsschmieden“ zum taktbestimmenden Element definiert. Weil die Präzisionsschmiedeanlage den höchsten Maschinenstundensatz hat, sollen die Prozesszeiten der weiteren Fertigungsschritte mit dem des Präzisionsschmiedens harmonisiert werden.

Um die Schmiedewärme bei der unmittelbar anschließenden Wärmebehandlung nutzen zu können, muss die integrierte Wärmebehandlung spätestens 5 Sekunden nach dem Schmieden beginnen. Um dies zu schaffen, werden die Teile von der Presse zur Wärmebehandlung mit Hilfe eines Roboters gefördert.

Entsprechend dem Beanspruchungsprofil der geschmiedeten Bauteile werden diese durch eine Zweiphasenströmung gehärtet. Die Randschichtvergütung im Bauteil wird somit direkt aus der Schmiedewärme erzeugt. Der Abkühlverlauf kann optimal auf eine bestimmte Einhärtungstiefe und Grundhärte abgestimmt werden [BAC06]. Die Härte- bzw. Abkühlzeit ist somit der entscheidende Faktor zum Erzielen einer optimalen Wärmebehandlung.

Die Abkühlzeit bei der integrierten Wärmebehandlung kann auf einen Wert zwischen 10 und 25 Sekunden eingestellt werden [MOL07]. Die anschließende technisch bedingte Liegezeit hängt von diesem technologischen Parameter ab. Je kürzer die Abkühlzeit, desto höher ist die Resttemperatur des Schmiedeteils. Somit desto länger ist die technisch bedingte Liegezeit, die der Zeit zum Abkühlen von der Rest- auf die Raumtemperatur entspricht.

Daher können unterschiedliche Prozesskettenvarianten gestaltet werden in Abhängigkeit von der technischen Auslegung der integrierten Wärmebehandlung. Im Rahmen dieser Arbeit werden beispielhaft zwei Varianten dargestellt, die hauptsächlich der Validierung der entwickelten Methoden aus Kap. 6 dienen. Beim ersten Fall beträgt die

Härtezeit 10 Sekunden und beim zweiten 25 Sekunden. Bild 8-4 zeigt vereinfacht die Struktur dieser beiden Prozesskettenvarianten.

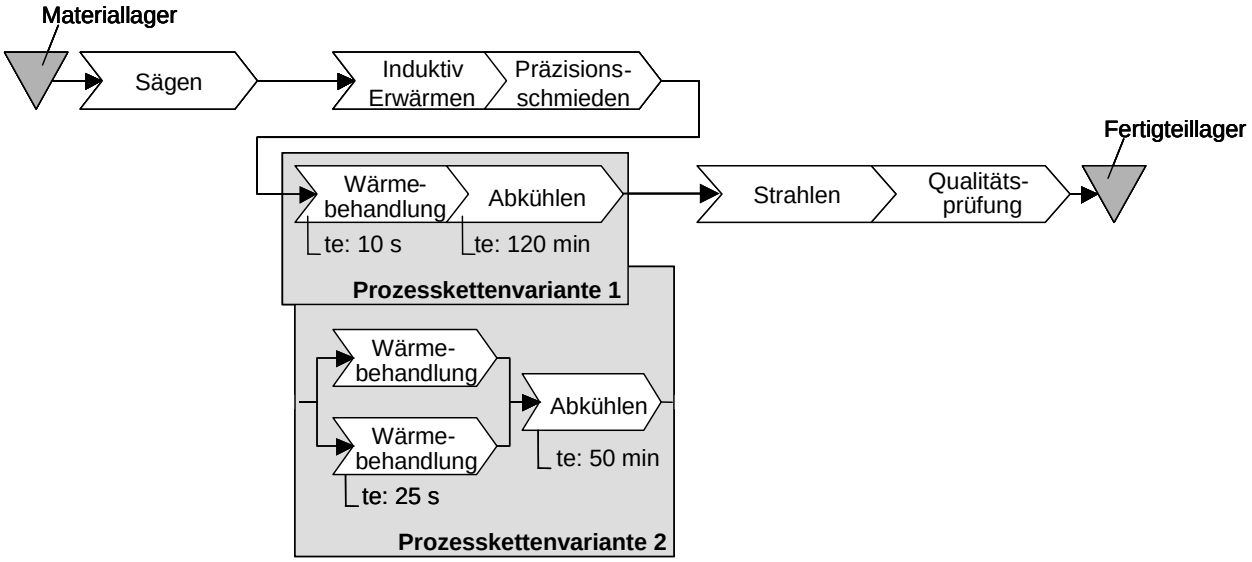


Bild 8-4: Struktur der zwei Prozesskettenvarianten zum Präzisionsschmieden

Bei einer Abkühlzeit von 10 Sekunden wird der Ausbringungstakt der Schmiedepresse von 15 Sekunden dadurch erreicht, dass die Handhabungszeit von 5 Sekunden zum Prozesselement der integrierten Wärmebehandlung zählt. Die Werkstücktemperatur nach der Wärmebehandlung beträgt ungefähr 200 °C. Technologisch bedingt müssen die Teile auf einem Band liegen, bis sie die Raumtemperatur erreichen. Diese Abkühlzeit dauert circa 2 Stunden. Um eine getaktete Linie gestalten zu können, ist ein Umlaufband als Speicher zwischen der integrierten Wärmebehandlung und der anschließenden Qualitätssicherung notwendig. Das Band wird somit eine Pufferkapazität von mindestens 480 (2 Stunden dividiert durch die Taktzeit von 15 Sekunden) Teilen haben müssen.

Beträgt dagegen die Härtezeit 25 Sekunden, so sind zwei Anlagen zur integrierten Wärmebehandlung notwendig, um den Ausbringungstakt von 15 Sekunden zu schaffen. Der Handhabungsroboter wird in diesem Fall in der Art konzipiert, dass er beide Anlagen bedienen kann. Nach einer Härtezeit von 25 Sekunden haben die Bauteile eine Temperatur von 100 °C. Die notwendige Zeit zum Abkühlen auf eine Raumtemperatur beträgt in diesem Fall ca. 50 Minuten. Dann muss das Abkühlband eine Pufferkapazität von mindestens 200 Teilen haben.

Die abschließende Qualitätssicherung, die in Form einer zerstörungsfreien Bauteilprüfung stattfindet, dauert ungefähr 90 Sekunden. Durch eine 6-fache Aufstellung der Prüfanlagen ist eine Taktzeit von 15 Sekunden möglich. Bei der Einführung einer neuen Technologie ist eine 100%ige Bauteilprüfung zwingend erforderlich. Wenn die Technologie eine hohe Prozesssicherheit während der Wachstumsphase erreicht, besteht später die Möglichkeit zur Reduzierung des Prüfaufwands und somit der Prüfanlagenzahl.

Die dem Schmieden vorgelagerten Prozessschritte müssen auch eine Taktung von 15 Sekunden erreichen, um eine One-Piece-Flow-Linienfertigung erzielen zu können.

Eine vollautomatisierte Schmiedekette setzt eine hohe Reproduzierbarkeit aller einzelnen Fertigungsschritte voraus. Um dies beim Prozessschritt „Trennen“ zu erreichen, wird eine Hochgeschwindigkeitssäge eingesetzt, die das Sägen von Zuschnitten in 15 Sekunden ermöglicht. Gegenüber einer Schere, die in der Regel bei konventionellen Schmiedeprozessketten eingesetzt wird, hat das Sägen eine höhere Prozesssicherheit. Dafür muss ein Schnittverlust in Kauf genommen werden. Die Abschnittlänge und die Schnittflächenqualität haben eine hohe Reproduzierbarkeit.

Nach dem Hochgeschwindigkeitssägen müssen die Teile auf die Schmiedetemperatur von ca. 1.200 °C erwärmt werden. Die Erwärmungsphase beträgt circa 25 Minuten. Um auch hier eine Linearisierung und Taktung der Prozesskette sicherzustellen, ist eine Durchlaufinduktionsanlage einzusetzen. Um den Takt von 15 Sekunden zu ermöglichen, muss diese Durchlaufanlage eine Kapazität von mindestens 100 (25 Minuten dividiert durch Taktzeit von 15 Sekunden) Teilen haben.

8.2.1.3 Logistische Auswertung der Schmiedeprozesskette

Bei einem konventionellen Modell zum Technologiemanagement wird das Gestaltungsszenario ausgewählt, welches die geringsten Implementierungskosten verursacht oder zu einer besseren Bauteilqualität führt.

Der in dieser Arbeit dargestellte Ansatz zielt auf eine simultane Betrachtung der technischen und logistischen Aspekte ab und schenkt der Logistik bereits in den frühen Phasen des Technologielebenszyklus eine große Aufmerksamkeit. Deshalb wird in diesem Schritt die Logistikleistung der zwei in 8.2.1.2 betrachteten Prozesskettenvarianten mit Hilfe von SiMPL ausgewertet. Dabei werden die jährliche Ausbringung und mittlere Auftragsdurchlaufzeit als unternehmensinterne Logistikziele gemessen.

Bei unterschiedlichen Einstellungen des Lieferanten-Lieferverhaltens und des Kunden-Bestellverhaltens wird anschließend die Liefertermintreue als weitere entscheidende Logistikzielgröße gemessen.

Um die Vergleichbarkeit zwischen den beiden Prozesskettenvarianten zu ermöglichen, sind die Parameter zur Modellierung der Simulationsumgebung gleich eingestellt worden. Hierfür wurden die entwickelten Simulationsmodule „Zulieferer“ und „Kunde“ zur Abbildung unterschiedlicher *Logistikverhalten* verwendet. Tabelle 8-2 fasst die eingestellten Parameter zusammen. Diese werden später detaillierter beschrieben.

In beiden Varianten war der direkte Kunde (Zerspanbetrieb) der Bestellauslöser. Er rief seine Bedarfe entsprechend einem Rahmenvertrag wöchentlich ab. Zusätzlich zu jedem Lieferabruf lieferte der Kunde vier Prognosen für die bevorstehenden vier Wochen. Mit Hilfe der Simulationskomponente „Kunde“ wurde der Zerspanbetrieb so modelliert, dass er auf Fehlmengen reagierte und dementsprechend die Prognosen anpasste. Die Menge im Rahmenvertrag betrug 1.187.535 Einheiten, die entsprechend einem vorgegebenen Hochlauf im Laufe des ganzen Jahres produziert werden soll. Die ersten 6 Monate nach Einführung der neuen Technologie stellen die Hochlaufphase dar. In dieser Periode steigt der monatliche Kundenbedarf um jeweils 36,67 % von 78.041 auf 106.655 Einheiten an.

Tabelle 8-1 zeigt eine detaillierte Aufteilung des jährlichen Kundenbedarfs. Die genannte Gesamtmenge ist die Summe der jährlichen Kundenbedarfe für 18 unterschiedliche Produkte und beträgt 1187535 Kurbelwellen. In der simulierten Periode von 12 Monaten wurden insgesamt 952 Kundenbestellungen ausgelöst.

Tabelle 8-1: Aufteilung der Kundenaufträge

	Aufträge Gesamt	Aufträge A-Teile	Aufträge B-Teile	Aufträge C-Teile
Gesamtmenge pro Jahr [Stück]	1187535	895845	235845	55845
Anzahl Kundenaufträge [-]	952	520	312	120
Mittlere Auftragsgröße [Stück]	1274	1723	756	465
Standardabweichung [Stück]	586	180	360	178

2 dieser 18 Produkte sind mit 75,44 % der Summe die A-Teile, 6 sind die B-Teile und die restlichen 10 repräsentieren mit einem Gesamtanteil von 4,7 % die C-Teile. Die Bearbeitungszeiten beim Schmiedeprozess aller verschiedenen Produkte sind ungefähr gleich. Jeder Produktwechsel bedarf dagegen einer Umrüstung der Anlagen, deren Aufwand unterschiedlich ist und je nach Bauteil zwischen 15 und 45 Minuten variiert.

Das produzierende Unternehmen in der modellierten Lieferkette (Schmiedebetrieb) berechnete seinen Bedarf und bestellte bedarfsgerecht bei seinem Lieferanten.

Mit Hilfe der Simulationskomponente „Lieferant“ wurde dann das Lieferverhalten des Rohstofflieferanten modelliert.

Es wurden darüber hinaus einige Annahmen getroffen, um die schmiedetechnische Prozesskette zu modellieren, welche aus ersten Ergebnissen des Sonderforschungsbereichs SFB 489 abgeleitet wurden. So wurde z. B. die Standmenge der Schmiedewerkzeuge mit 4.000 Stück eingestellt. Des Weiteren wurden unterschiedliche Ausschussraten zwischen 1 % und 4 % angenommen. Die technische Verfügbarkeit der einzelnen Maschinen wurde für alle Läufe gleich eingestellt und betrug zwischen 85 % und 95 %. Diese eingestellten Werte wurden aus dem dargestellten realen Betrieb abgeleitet. So beträgt z. B. die technische Verfügbarkeit der Hochgeschwindigkeitssäge 95 % und die der Schmiedepresse 85 %.

Um die logistische Nachhaltigkeit der resultierenden Prozesskette zu validieren, wurde die Lieferkette in drei unterschiedlichen *Logistikvarianten* simuliert. Zur Modellierung des Kunden-Bestellverhaltens wurden die Parameter NF, α und β nach jeder Simulationsreihe neu eingestellt (vgl. 6.1.2.3). Ebenfalls wurden die Parameter zum Abbilden von Liefertermin- und -mengenabweichungen in drei unterschiedlichen *Logistikvarianten* eingestellt (vgl. 6.1.2.1).

Tabelle 8-2 zeigt die entsprechenden Einstellparameter. *Logistikvariante* A stellt dabei die „stabile Lieferkette“ dar. Der Lieferant liefert immer gemäß den Bestellungen vom Schmiedeunternehmen und der Zerspanbetrieb hat ein konstantes Bestellverhalten. Dieses Szenario, das nur selten in der Realität zutrifft, dient der Messung der Grenzkapazität des Schmiedeunternehmens. *Logistikvariante* B präsentiert eine „realitätsnahe Lieferkette“. Die Kenntnisse hierzu wurden aus empirischen Untersuchungen im Rahmen des SFB 489 gewonnen. *Logistikvariante* C dagegen modelliert eine „turbulente Lieferkette“, welche die interne Produktionsplanung des Schmiedeunternehmens erschwert. Diese Modellierungsvariante dient ebenso zur Ermittlung der Grenzkapazität der resultierenden Prozesskette.

Tabelle 8-2: Einstellparameter zur Modellierung der Lieferkette

	Lieferantenparameter				Kundenparameter		
	μ_{LM}	σ_{LM}	μ_{LT}	σ_{LT}	NF	α	β
Logistikvariante A: Stabile Lieferkette	0	0	0	0	100	0	0
Logistikvariante B: Reale Lieferkette	2	4	2	5	110	50	25
Logistikvariante C: Turbulente Lieferkette	25	5	5	5	120	100	50

μ_{LM} mittlere Liefermengenabweichung [%]
σ_{LM} Standardabweichung der Liefermengenabweichung [%]
μ_{LT} mittlere Lieferterminabweichung [BKT]
σ_{LT} Standardabweichung der Lieferterminabweichung [BKT]
NF Veränderung der Marktnachfrage [%]
α Konfigurationsparameter „Fehlmengenausgleich“ [%]
β Konfigurationsparameter „Lieferschwankungsausgleich“ [%]

Für jede *Logistikvariante* wurden 10 Versuche gestartet, die eine durchschnittliche Simulationsdauer von ca. einer Stunde hatten. Die Simulationsergebnisse wurden mit der in SiMPL eingebauten Monitoringkomponente in Kennzahlen und Grafiken verdichtet, und die Logistikgrößen wurden anschließend gemessen bzw. berechnet. Bei jeder Messreihe wurden Höchst- und Niedrigstwert nicht berücksichtigt, und es wurde aus den restlichen 8 Werten der Mittelwert berechnet. Dadurch wurde die Verfälschung der Ergebnisse durch Ausnahmeereignisse vermieden.

Tabelle 8-3 fasst die Simulationsergebnisse zusammen. Die Liefertermintreue wurde dabei als prozentualer Anteil der hinsichtlich Liefertermin und -menge erfüllten Aufträge in Bezug auf die Auftragsgesamtanzahl definiert. Dabei wurde ein Toleranzfenster von plus/minus einem Tag festgelegt.

Auch wenn die Logistikleistungen beider *Logistikvarianten* vergleichbar sind, zeigt die Prozesskette mit der redundanten Aufstellung der Anlage zur integrierten Wärmebehandlung leichte Vorteile. Bei allen drei modellierten Lieferketten erzielte die zweite *Lo-*

gistikvariante jeweils eine höhere jährliche Ausbringung, eine kürzere Auftragsdurchlaufzeit sowie eine bessere Liefertermintreue.

Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Logistikleistung des Schmiedeunternehmens bedeutend mit den steigenden Unsicherheiten in der Lieferkette sinkt. Dies betrifft vor allem die Liefertermintreue, die um 18,59 % bzw. 28,14 % sinkt, wenn die Lieferkettenglieder gemäß *Logistikvariante* B bzw. C liefern bzw. bestellen.

Tabelle 8-3: Simulationsergebnisse Präzisionsschmieden

	Prozesskettenvariante 1: Abkühlzeit 10s			Prozesskettenvariante 2: Abkühlzeit 25s		
	L_m [Stück/Jahr]	ZDA_m [BKT]	LTT_m [%]	L_m [Stück/Jahr]	ZDA_m [BKT]	LTT_m [%]
Logistikvariante A	1.234.985	2,14	95,8	1.294.985	2,09	96,3
Logistikvariante B	1.106.578	2,87	76,9	1.107.279	2,61	78,4
Logistikvariante C	1.098.787	3,76	65,3	1.105.787	3,59	69,2

L_m mittlere Leistung [Stück/Jahr]
ZDA_m mittlere Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
LTT_m mittlere Liefertermintreue [%]

Um die Logistikleistung aus Tabelle 8-3 weiterhin zu beurteilen, wurden diese der Leistung eines realen Schmiedebetriebs gegenübergestellt, welches das konventionelle Gesenkschmieden im Einsatz hatte. Das betrachtete Schmiedeunternehmen produzierte zu vergleichbaren logistischen Bedingungen wie die *Logistikvariante* B. Es wurde dabei eine jährliche Ausbringung von 823.356 Schmiedeteilen erreicht. Weil die Wärmebehandlung in Öfen stattfand, wurden sehr lange Übergangszeiten gemessen, die zu einer Verlängerung der Auftragsdurchlaufzeit führten. ZDAm betrug dabei 9,17 BKT mit einer Standardabweichung von 3,86 BKT. Abschließend wurde eine Liefertermintreue von 86,9 % gemessen.

Es ist daraus abzuleiten, dass allein die Einführung der neuen Technologie zu einer Steigerung der jährlichen Ausbringung um 34,5 % und zu einer Verkürzung der mittleren Auftragsdurchlaufzeit um 71,5 % führte. Die Liefertermintreue wies dagegen auf ein noch offenes Potenzial hin. Mit einer besseren logistischen Planung und Steuerung der aus der Technologieänderung resultierenden Prozesskette kann dieses Potenzial ausgeschöpft werden. Hierfür bietet sich der Ansatz zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung an (vgl. 8.2.2).

8.2.1.4 Neugestaltung der Lieferkette infolge der Technologieänderung

Eine Technologieänderung beeinflusst in erster Linie die innerbetriebliche Prozesskette. Sie kann aber auch eine Auswirkung auf die überbetriebliche Lieferkette haben. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 489 wurde untersucht, ob nach der Einführung des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung eine Zusammen-

legung der Schmiede- und Zerspanprozesskette möglich ist. Zum Zeitpunkt der Untersuchung waren diese zwei Prozesskette räumlich getrennt. In den meisten Fällen präsentieren sie zwei unterschiedliche Glieder der Lieferkette, wobei der Zerspanbetrieb der direkte Kunde des Schmiedeunternehmens ist.

In der vorliegenden Arbeit wurden mit Hilfe des entwickelten Werkzeugs SiMPL drei unterschiedliche Lieferketten gestaltet und miteinander hinsichtlich der Erreichung der logistischen Zielgröße verglichen. Die drei *Lieferkettenszenarien* unterscheiden sich im Wesentlichen in der Struktur der Lieferkette sowie in der Ressourcenanordnung der innerbetrieblichen Prozesskette der Schmiedeunternehmen (vgl. Bild 8-5).

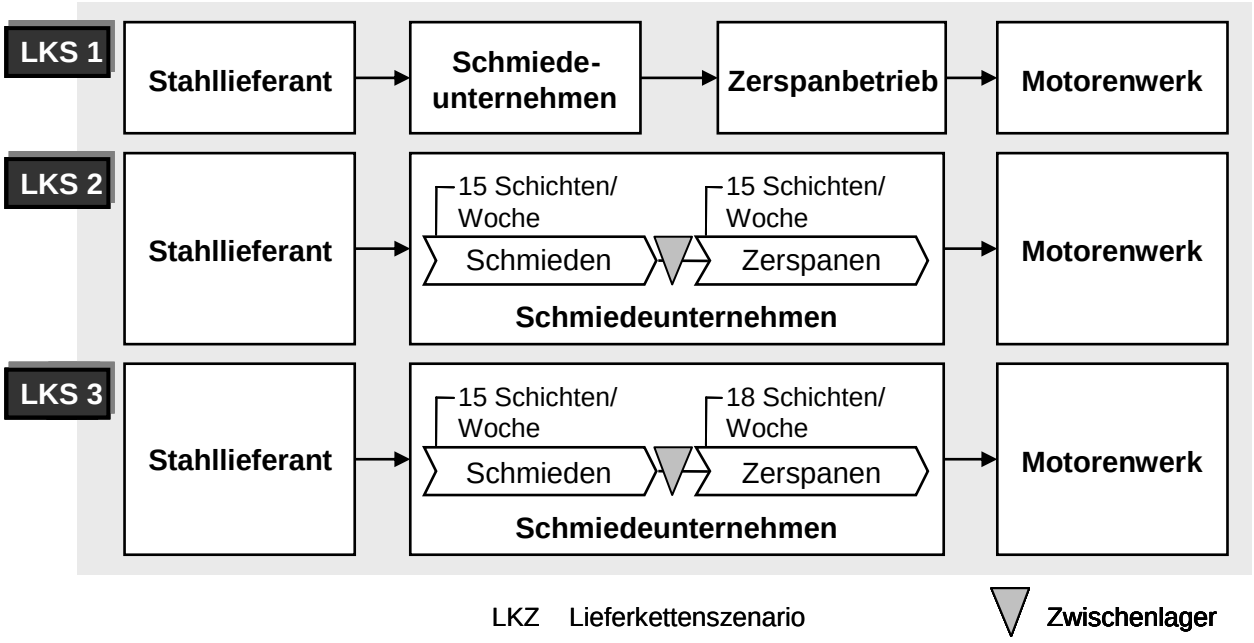


Bild 8-5: Darstellung der modellierten Lieferketten-Szenarien

Im ersten *Lieferkettenszenario* 1 wurden die zwei Teilprozessketten, entsprechend dem Ist-Zustand, räumlich getrennt. Es besteht somit eine Lieferkette, die neben dem Rohstofflieferanten und dem Endkunden sowohl einen Schmiede- als auch einen Zerspanbetrieb hatte. In diesem Szenario ist der Zerspanbetrieb der direkte Kunde des Schmiedeunternehmens. Wird z. B. die Termintreue der Schmiede gemessen, so wird die Lieferfähigkeit des Schmiedeunternehmens gegenüber den Lieferabrufen des Zerspanbetriebs beurteilt.

Dann wurden die Teilprozessketten Schmieden und Zerspanen zu einer Prozesskette aggregiert. Die gesamte Lieferkette wurde somit durch die drei Glieder „Rohstofflieferant“, „Schmiedeunternehmen“ und „Kunde“ modelliert. Weil sich die Produktionsraten der zwei Teilprozessketten stark unterscheiden, wurden zwei Varianten dieses *Lieferkettenszenarios* 2 und 3 konstruiert. Den Hauptunterschied dieser beiden Varianten stellte das Schichtmodell dar. Während in beiden Teilprozessketten des ersten *Lieferkettenszenarios* nach demselben Schichtmodell produziert wurde, hatte *Lieferkettenszenario* 2 zwei unterschiedliche Schichtmodelle.

In *Lieferkettenszenario* 2 wurde in der Schmiede und im Zerspanbetrieb 15 Schichten pro Woche produziert. Weil die Produktionsraten, trotz redundanter Maschinenaufstellung, nicht identisch waren, wurden beide Teilprozessketten durch ein Zwischenlager entkoppelt. Dies war zwingend erforderlich, u. a. weil die Rüstzeiten sowie technischen Verfügbarkeiten beider Teilprozessketten unterschiedlich waren. In *Lieferkettenszenario* 3 dagegen wurde 15 Schichten pro Woche geschmiedet und 18 Schichten pro Woche zerspant.

Im folgenden Abschnitt dieses Kapitels werden die Ergebnisse der Logistikleistungsauswertung diskutiert.

8.2.1.4.1 Simulationsumgebung

Um die unterschiedlichen *Lieferkettenszenarien* mit SiMPL zu modellieren, wurden die entsprechenden Tabellen in der zentralen Datenbank angepasst. Die relevanten Tabellen sind „Arbeitsgang“, „LogistikModellFirma“ und „LogistikModell“ (vgl. Kap. 7.2.1). Anschließend wurden die *Lieferkettenszenarien* einzeln simuliert und die Simulationsergebnisse dokumentiert.

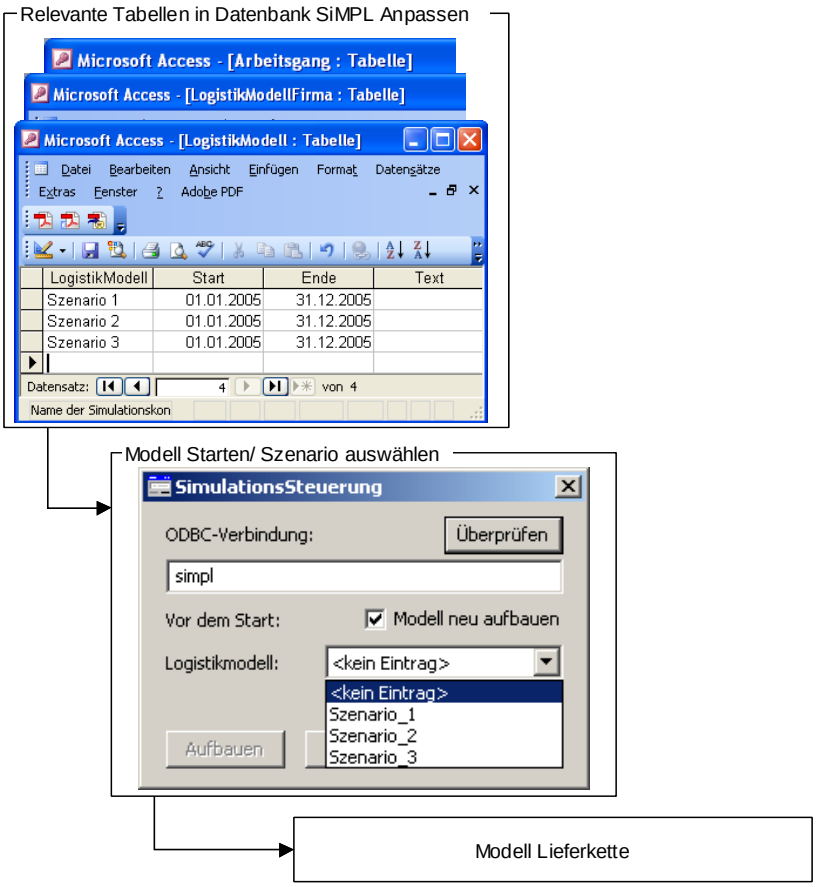


Bild 8-6: Vorgehensweise zur Szenariomodellierung mit Hilfe von SiMPL

Im Durchschnitt hat die Simulation von 12 Monaten Produktion eine Stunde gedauert. Bild 8-6 zeigt die Vorgehensweise bei der Nutzung von SiMPL zur Modellierung der

einzelnen Szenarien. Die Zeit zum Aufbau eines neuen Simulationsmodells dauerte dank der generischen Entwicklung von SiMPL nur wenige Minuten.

Bei jedem Simulationsstart besteht die Möglichkeit, das Modell neu aufzubauen. Hierfür stehen in der Bedienungsmaske „SimulationsSteuerung“ sämtliche Modelle bzw. Szenarien zur Auswahl, die zuvor in den Tabellen „LogistikModellFirma“ und „LogistikModell“ abgebildet wurden. Die weiteren Tabellen der Datenbank wurden nicht geändert. Sie modellieren die konstanten Bestandteile des Simulationsmodells wie z. B. die Rahmenverträge, die Kunden oder Lieferanten.

8.2.1.4.2 Diskussion der Simulationsergebnisse

Bei allen Simulationsversuchen wurden das Lieferverhalten der Lieferanten und die Bestelldynamik der Kunden basierend auf Untersuchungen bei einem realen Unternehmen eingestellt (vgl. *Logistikvariante* B in Tabelle 8-2).

Ähnlich wie in Abschnitt 8.2.1.3 wurden für jedes Szenario 10 Versuchsläufe durchgeführt, und sowohl der Höchst- als auch Niedrigstwert bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Die folgende Tabelle 8-4 zeigt die Einzelergebnisse des Lieferkettenszenarios 1. Die gerasterten Zellen stellen dabei die jeweiligen Höchst- bzw. Niedrigstwerte dar.

Tabelle 8-4: Darstellung der Einzelergebnisse des *Lieferkettenszenarios* 1

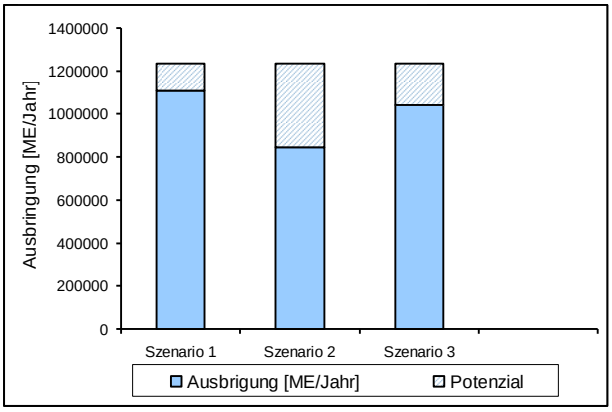
	Lm [Stück]	**ZDAm [BKT]**	**LTT [%]**
Versuchslauf 1	1.128.764	2,65	79,3
Versuchslauf 2	1.098.697	2,73	79,2
Versuchslauf 3	1.200.021	2,03	77,3
Versuchslauf 4	1.125.446	2,91	77,9
Versuchslauf 5	1.003.562	2,45	74,3
Versuchslauf 6	1.140.576	2,67	80,2
Versuchslauf 7	1.017.897	2,51	78,7
Versuchslauf 8	1.110.672	2,86	78,1
Versuchslauf 9	1.129.289	2,42	77,2
Versuchslauf 10	1.106.889	2,58	79,4

Max	**1.200.021**	**2,91**	**80,2**
Min	**1.003.562**	**2,03**	**74,3**
Mittelwert	**1.107.279**	**2,61**	**78,4**

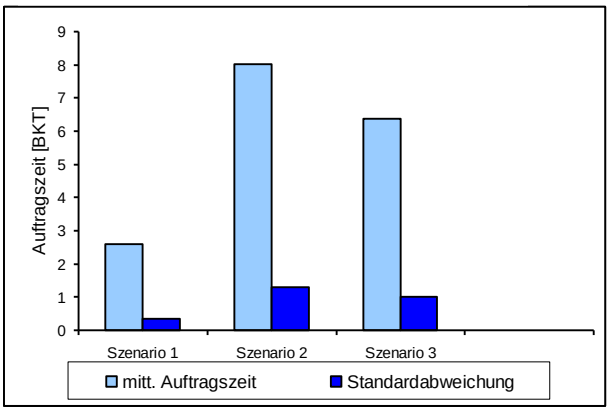
Lm mittlere Leistung [Stück]
ZDAm mittlere Auftragsdurchlaufzeit [BKT]
LTT Liefertermintreue [%]

Die resultierenden Werte wurden abschließend zusammen tabellarisch aufgestellt und grafisch dargestellt. Bild 8-7 a) zeigt die jährliche Ausbringung und Bild 8-7 b) die mittlere Auftragsdurchlaufzeit der unterschiedlichen drei *Lieferkettenszenarien*.

a) Jährliche Ausbringung [ME]



b) Mittlere Auftragsdurchlaufzeit [BKT]



Szenario 1: Lieferkette mit 4-Gliedern: Schmieden und Zerspanen räumlich getrennt
Szenario 2: Lieferkette mit 3-Gliedern: Schmieden und Zerspanen je in 15 Schichten/ Woche
Szenario 3: Lieferkette mit 3-Gliedern: Schmieden in 15 Schichten und Zerspanen in 18 Schichten/ Woche

Bild 8-7: Simulationsergebnisse zur Bewertung der jährlichen Ausbringung und mittleren Auftragszeit der unterschiedlichen Lieferkettenszenarien

Die Materialflusssimulation hat gezeigt, dass das *Lieferkettenszenario* 2 mit 846.213 Schmiedeteilen die geringste jährliche Ausbringung erzielt. Diese Ausbringung entsprach 68,52 % des möglichen Potenzials. Das Ausbringungspotenzial wurde dadurch errechnet, dass die Warte- bzw. Blockierzeiten der Maschinen gleich null gesetzt wurden und somit eine hohe Maschinenauslastung erzielt wurde.

Die Simulationsergebnisse haben in der Tat gezeigt, dass im *Lieferkettenszenario* 2 die Schmiedepresse mit 77% Auslastung im Unterlastbereich lag. Mit Hilfe der in SiMPL eingebauten Komponente zur Messung der Logistikleistung wurden für das *Lieferkettenszenario* 2 die Produktionskennlinien der Schmiedepresse errechnet (vgl. 3.3). Das folgende Bild 8-8 zeigt die Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinie sowie den gemessenen Betriebspunkt.

Dadurch, dass die Teilprozessketten „Schmieden“ und „Zerspanen“ in verschiedenen Takten laufen, konnte die Schmiedepresse nur zu 77 % ausgelastet werden. Obwohl die maximal mögliche Leistung 21 Std/BKT beträgt, hat die Schmiedepresse nur eine durchschnittliche Leistung von 16,42 Std/BKT. Der Betriebspunkt zeigt ebenfalls eine mittlere Durchlaufzeit von 0,41 BKT und einen mittleren Bestand an der Schmiedepresse von 7,41 Std.

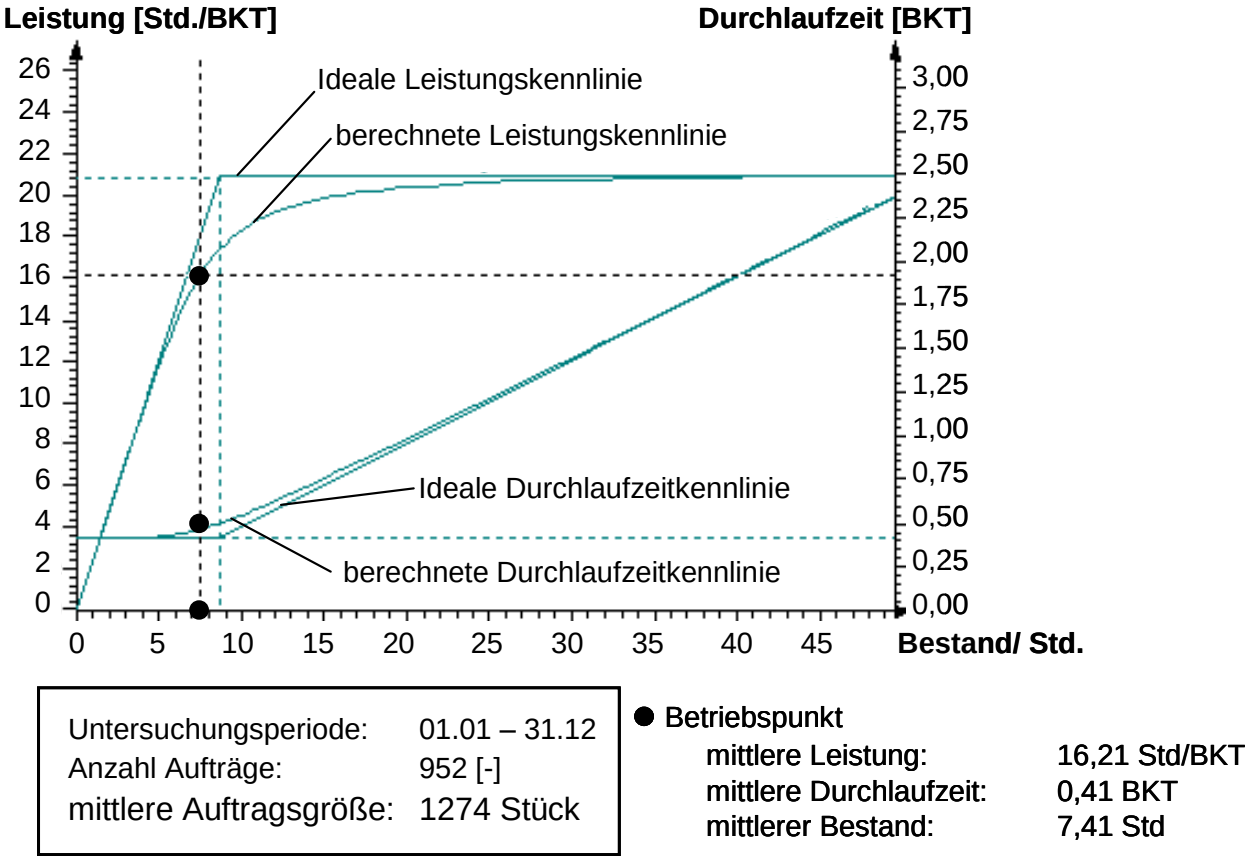
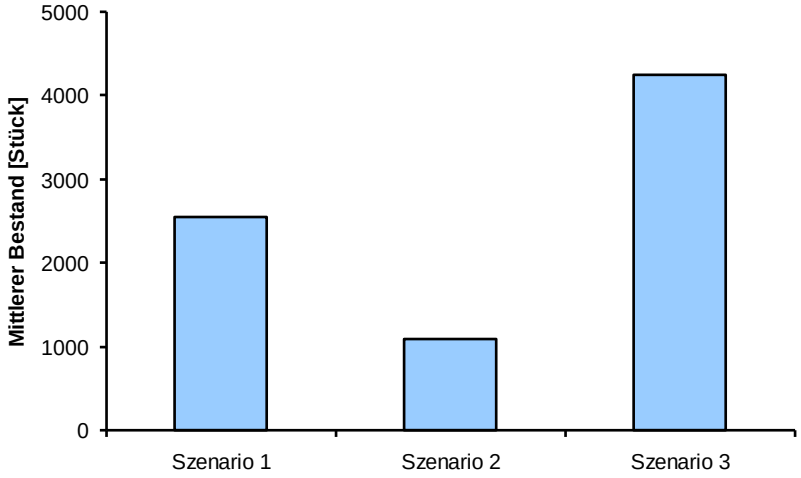


Bild 8-8: Produktionskennlinien der Schmiedepresse bei *Lieferkettenszenario* 2 – Schmieden und Zerspanen jeweils in 15 Schichten

Beim *Lieferkettenszenario* 3 wurde die Kapazität der Zerspananlagen um 3 Schichten pro Woche erhöht. Dadurch wurde eine Steigerung der Ausbringung um 23 % gemessen, und die jährliche Ausbringung erreichte 1.040.842 Schmiedeteile. Allerdings konnte die Erhöhung der jährlichen Ausbringung nur auf Kosten des mittleren Umlaufbestands erreicht werden.

Bild 8-9 zeigt den gemessenen mittleren Umlaufbestand der Schmiedeprozesskette bei den drei unterschiedlichen Lieferkettenszenarien. Im *Lieferkettenszenario* 1 betrug der mittlere Umlaufbestand 2555 Stück. Der größte Anteil des Bestands befand sich vor der Schmiedepresse. Somit konnte sie eine hohe Auslastung erreichen. Das *Lieferkettenszenario* 2 zeigt mit 1096 Stück den niedrigsten mittleren Umlaufbestand. Dies resultierte in Kapazitätsverlusten der Schmiedepresse und somit in der niedrigen jährlichen Ausbringung.



Szenario 1:	Lieferkette mit 4-Gliedern: Schmieden und Zerspanen räumlich getrennt
Szenario 2:	Lieferkette mit 3-Gliedern: Schmieden und Zerspanen je in 15 Schichten/ Woche
Szenario 3:	Lieferkette mit 3-Gliedern: Schmieden in 15 Schichten und Zerspanen in 18 Schichten/ Woche

Bild 8-9: Simulationsergebnisse zur Bewertung des mittleren Umlaufbestands der Schmiedeprozesskette bei den unterschiedlichen Lieferkettenszenarien

Das *Lieferkettenszenario* 3 zeigt mit 4240 Stück den höchsten Umlaufbestand. Zum einen, weil die Schmiedepresse gut ausgelastet werden konnte und zum anderen, weil die Zerspananlagen immer einen Arbeitsvorrat für die Schichten am Wochenende hatten. Der höchste Anteil am Umlaufbestand befand sich somit vor der Schmiedepresse und im Zwischenpuffer zwischen der Schmiede- und Zerspanprozesskette.

Damit die Zerspananlagen einen ausreichenden Arbeitsvorrat für die Schichten am Wochenende hatten, musste die Schmiedeteilprozesskette im Laufe der Woche überproduzieren. Der maximale Umlaufbestand wurde am Ende der fünfzehnten Schicht erreicht und betrug 3.570 Schmiedeteile.

Eine weitere logistische Größe, die in einem direkten Zusammenhang mit der jährlichen Ausbringung steht, ist die mittlere Auftragsdurchlaufzeit (ZDAm). *Lieferkettenszenario* 2 weist eine mittlere Auftragsdurchlaufzeit von 8,03 Betriebskalendertagen (BKT) auf. Dabei wurde eine Standardabweichung von 2,31 BKT gemessen. Dank der höheren Kapazität in *Lieferkettenszenario* 3 konnte ZDAm um 20,67 % auf 6,37 BKT reduziert werden.

In *Lieferkettenszenario* 1, wo die Teilprozessketten „Schmieden“ und „Zerspanen“ getrennt wurden, wurde die mittlere Auftragsdurchlaufzeit der innerbetrieblichen Prozesskette des Schmiedeunternehmens gemessen. Weil der direkte Kunde in diesem Fall der Zerspanbetrieb ist, hängen Reaktions- sowie Lieferzeit vom Schmiedebetrieb hauptsächlich von diesem Zeitanteil und weniger von der Auftragsdurchlaufzeit beim Zerspanbetrieb ab.

Neben den unternehmensinternen Zielgrößen wurde die Lieferleistung des Schmiedeunternehmens in den unterschiedlichen *Lieferkettenszenarien* bewertet. Hierfür wurde zum einen die Lieferterminabweichung in BKT gemessen und die Liefertermintreue in Prozent berechnet. Die erste der zwei Größen entspricht der Differenz zwischen dem zugesagten und dem tatsächlichen Liefertermin. Bei der Ableitung der Liefertermintreue wurde die Anzahl der innerhalb eines Toleranzfensters von zwei Tagen gelieferten Aufträge bezogen auf deren Gesamtzahl prozentual berechnet. Die Ergebnisse sind in Bild 8-10 visualisiert.

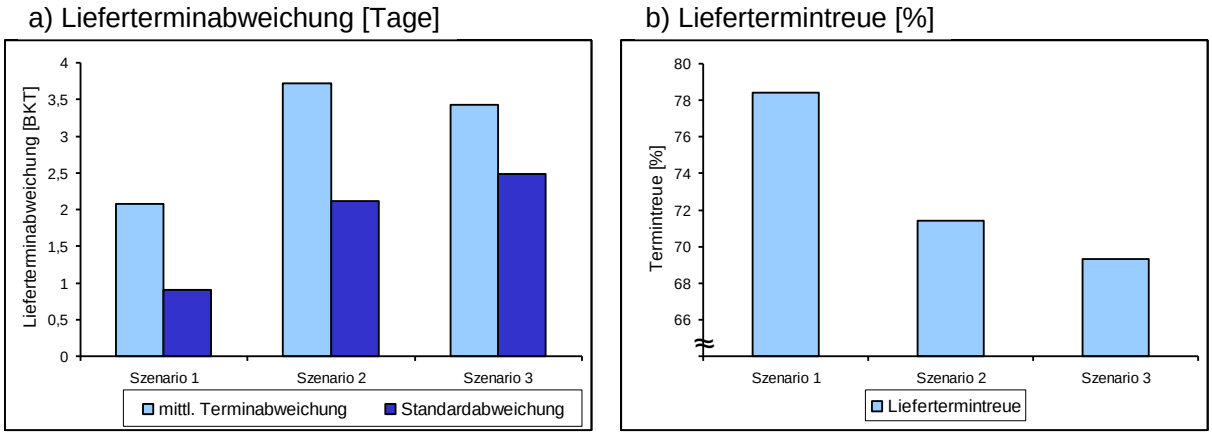


Bild 8-10: Simulationsergebnisse zur Bewertung der Lieferterminabweichung und Liefertermintreue der unterschiedlichen Lieferkettenszenarien

Die besten Ergebnisse erzielte Gestaltungsszenario 1 mit einer Lieferterminabweichung von 2,08 BKT und einer Standardabweichung von 0,91 BKT. Daraus resultierte eine Liefertermintreue von 78,4 %. Die Szenarien 2 und 3 hatten relativ schlechtere, dennoch vergleichbare Ergebnisse erreicht.

Die von vielen Unternehmen und Forschern verlangte Liefertermintreue von 99,73 % (entsprechend 3 σ) wird allein von der Ablösung des konventionellen Schmiedens durch eine neue Technologie nicht erreicht. Hierfür ist eine zielstrebigere Produktionsplanung und -steuerung zwingend erforderlich. Mit Hilfe der entwickelten Methode zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung werden die noch offenen logistischen Potenziale der neuen Technologie ausgeschöpft. Dies wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

Nach der logistischen Untersuchung der einzelnen *Lieferkettenszenarien* wird die Phase der Technologieentstehung mit der Auswahl des aus logistischer Sicht besten Gestaltungsszenarios abgeschlossen. Die oben ausgeführte Ergebnisdiskussion verdeutlicht, dass Szenario 1 (Trennung zwischen Schmiede- und Zerspanbetrieb) die beste Logistikleistung sowie das beste logistische Potenzial aufweist. Für die weiteren Schritte der Validierung wird dieses Szenario weiter verfolgt.

8.2.2 Logistische Beherrschung der Schmiedeprozesse während der Wachstumsphase

Der nächste Schritt des logistikgerechten Technologiemanagements ist die Wachstumsphase, die mit der ersten Einführung der neuen Technologie, in diesem Fall des Präzisionsschmiedens mit integrierter Wärmebehandlung, beginnt. Weil diese neue Technologie zum Zweck der Erprobung der technischen Machbarkeit erst bei einigen führenden Schmiedeunternehmen implementiert wurde, stehen noch keine realen Betriebsdaten aus der Serienfertigung zur Verfügung.

Um diesen Schritt des entwickelten Prozessmodells sowie die erarbeitete Methode zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung dennoch zu validieren, wurde das dritte Szenario aus der Technologieentstehungsphase simulativ untersucht. Hierfür wurden die gleichen Annahmen wie im vorherigen Abschnitt getroffen, um die Simulationsumgebung zu parametrieren.

Nach der Parametereinstellung wurde zuerst ein ganzes Betriebsjahr simuliert. Am Ende jedes Kalenderquartals wurde die Logistikleistung mit Hilfe der Monitoringkomponente ausgewertet. Ohne in das System einzugreifen, um die Planparameter zu ändern, wurde weiter simuliert.

In einer zweiten Versuchsreihe wurden am Ende jedes Kalenderquartals im Falle einer Nichterreichung der Logistikziele die entsprechenden Planparameter mit Hilfe der erarbeiteten Methode zur adaptiven PPS angepasst.

In der Regel hängt die Auswertungsfrequenz von der Reaktionszeit des Systems auf die angepassten Parameter sowie des Umfeld ab. Die Auswertungsfrequenz ist so einzustellen, dass die Systemdynamik berücksichtigt wird. In diesem untersuchten Validierungsbeispiel werden die Planparameter quartalsweise adaptiert, vor allem weil die betrachtete Systemumgebung stabil ist. Diese wird durch *Logistikvariante* B aus Tabelle 8-2 abgebildet.

Durch den Vergleich der erzielten Logistikleistungen kann die Methode zur adaptiven Produktionsplanung und -steuerung auf ihre Wirksamkeit erprobt werden. In Bild 8-11 sind die Auswertungsergebnisse am Beispiel der Liefertermintreue zusammengefasst. Am Ende der ersten Untersuchungsperiode wurde eine Liefertermintreue von 78 % gemessen. Ohne gründliche Untersuchung der Ursachen und ohne Anpassung der eingestellten Parameter im System bliebe die Liefertermintreue weit unter einem vorgegebenen Ziel von 95 % und würde zwischen 77 % und 79 % schwanken.

Die Zielvorgabe hängt entscheidend von der strategischen Positionierung des Unternehmens sowie vom Kunden ab. Die gemessene Liefertermintreue beim untersuchten Schmiedeunternehmen betrug 86% (vgl. 8.2.1.3). Das Unternehmensziel war zuerst fokussiert auf die erfolgreiche Implementierung der neuen Schmiedetechnologie, um Material- und Herstellkosten zu sparen und dabei die Liefertermintreue in einem ersten Schritt auf 95% zu verbessern.

Dank der adaptiven Produktionsplanung und -steuerung wurde die Liefertermintreue kontinuierlich verbessert und erreichte nach der ersten Anpassung 83,24 %, bevor sie

einen Wert von 96 % am Ende des dritten Kalenderquartals erreichte. Die Anwendung der Methode wird im Folgenden genauer beschrieben.

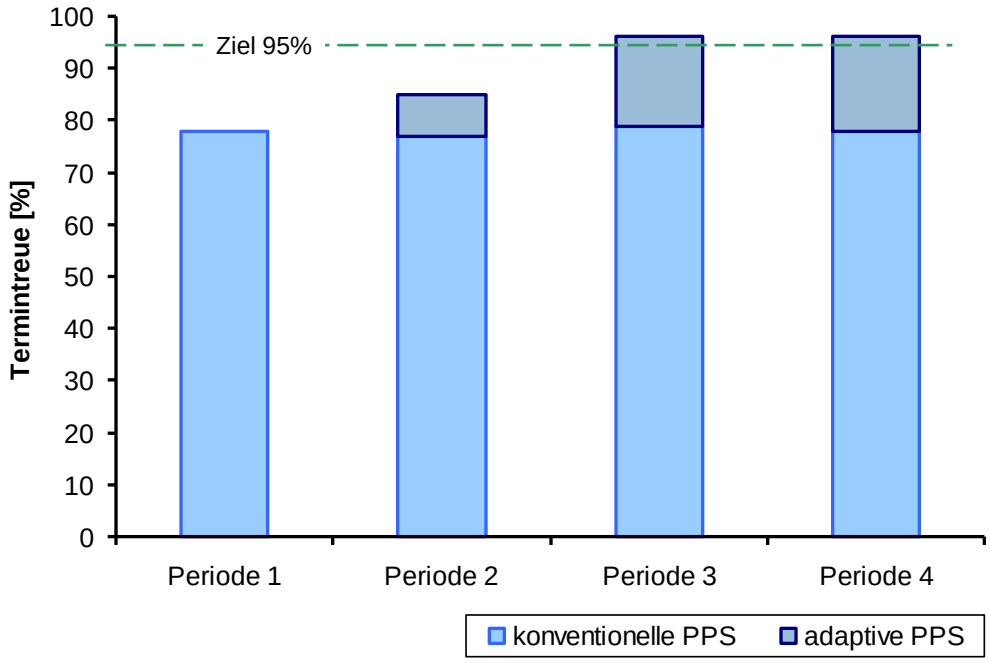


Bild 8-11: Vergleich zwischen der erzielten Liefertermintreue mit der konventionellen und adaptiven Produktionsplanung und -steuerung

Die Adaptation von Planparametern beginnt mit dem Monitoring. Neben der Messung der Logistikleistung werden die Prozessfähigkeitsparameter gemessen. Nach der ersten Auswertungsperiode, die drei Monate dauerte, wurden die in Tabelle 8-5 aufgelisteten Kennzahlen gemessen.

Tabelle 8-5: Gemessene Logistikleistung in der ersten Auswertungsperiode

Untersuchungsperiode	01.01. – 31.03.2005
Anzahl Kundenaufträge (Soll-Lieferaufträge) [-]	202
Gesamtbestellmenge (Soll-Liefermenge) [Stück]	244.399
Mittlere Kundenauftragsgröße [Stück]	1.210
Standardabweichung Kundenauftragsgröße [Stück]	599
Erzielte Ausbringung [Stück]	295.264
Anzahl Fertigungsaufträge [-]	173
Mittlere Fertigungsauftragsgröße [Stück]	1.700

Mittlere Auftragsdurchlaufzeit [BKT]	2,91
Standardabweichung Auftragsdurchlaufzeit [BKT]	0,61
ausgelieferte Kundenaufträge [-]	195
Gesamte Liefermenge [Stück]	236.782
Liefertermintreue [%]	78
Mittlere Lieferterminabweichung [BKT]	2,35
Standardabweichung Lieferterminabweichung [BKT]	2,94

Nach Ablauf der ersten Auswertungsperiode von 3 Monaten wurden 173 Fertigungsaufträge abgearbeitet mit einem Gesamtvolumen von 295.264 geschmiedeten Teilen. Die mittlere Auftragsdurchlaufzeit betrug 2,91 BKT mit einer Standardabweichung 0,61 BKT.

Obwohl mehr Kurbelwellen geschmiedet wurden als bestellt, wurde nur eine Liefertermintreue von 78 % erreicht. Ein Lieferauftrag wurde dabei als termintreu betrachtet, wenn der Ist-Liefertermin höchstens 1 BKT früher bzw. 1 BKT später als der Soll-Liefertermin lag. Bild 8-12 zeigt die kumulierte Soll- und Ist-Liefermenge.

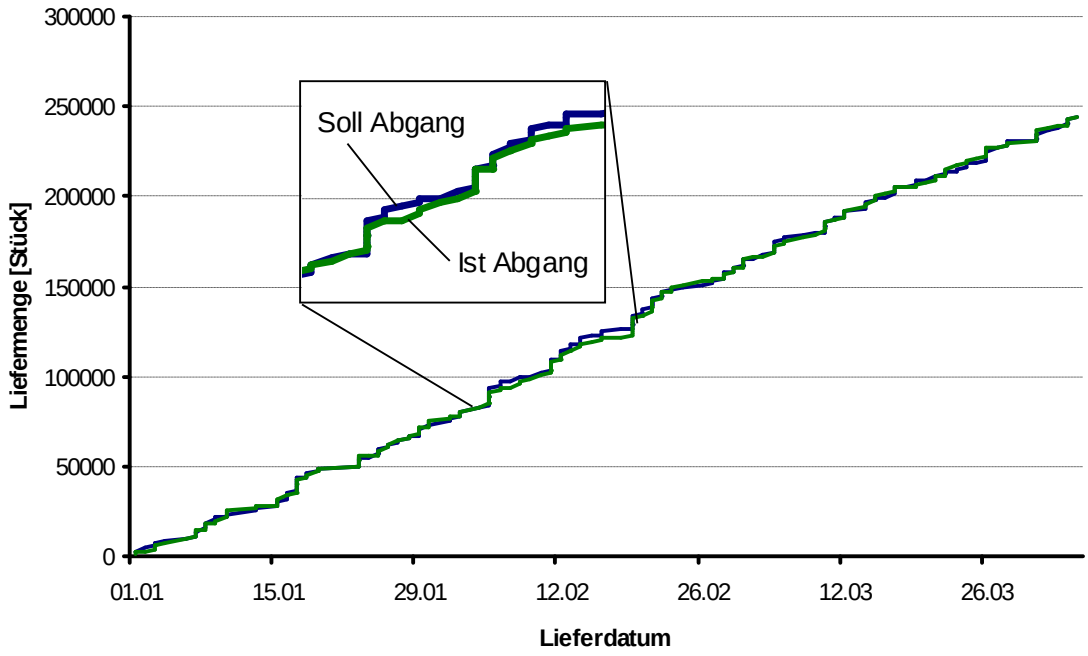


Bild 8-12: Soll-Ist-Vergleich der Liefermenge in der Untersuchungsperiode

Im ersten Jahresquartal konnten nur 195 Lieferaufträge erfüllt werden. Die kumulierte Liefermenge betrug 236.782 Schmiedeteile und erreichte nur 96 % der Soll-

Liefermenge. Außerdem wurden die 195 Lieferaufträge im Durchschnitt 2,35 BKT zu spät ausgeliefert. Daraus resultierte eine Liefertermintreue von 78 %.

Nach der Messung der Logistikleistung wurde die Verteilung der Logistikzielabweichung analysiert. In diesem beschriebenen Beispiel wurde die Lieferterminabweichung dargestellt. Die Verteilung der gemessenen Zielabweichungen wurde mit dem Werkzeug der statistischen Prozesskontrolle „Minitab“ untersucht. Minitab ist ein Produkt des Softwareunternehmens „Additive“ und ist speziell für statistische Analysen entwickelt worden [BAS07]. Mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests wurde geprüft, ob eine Normalverteilung vorlag.

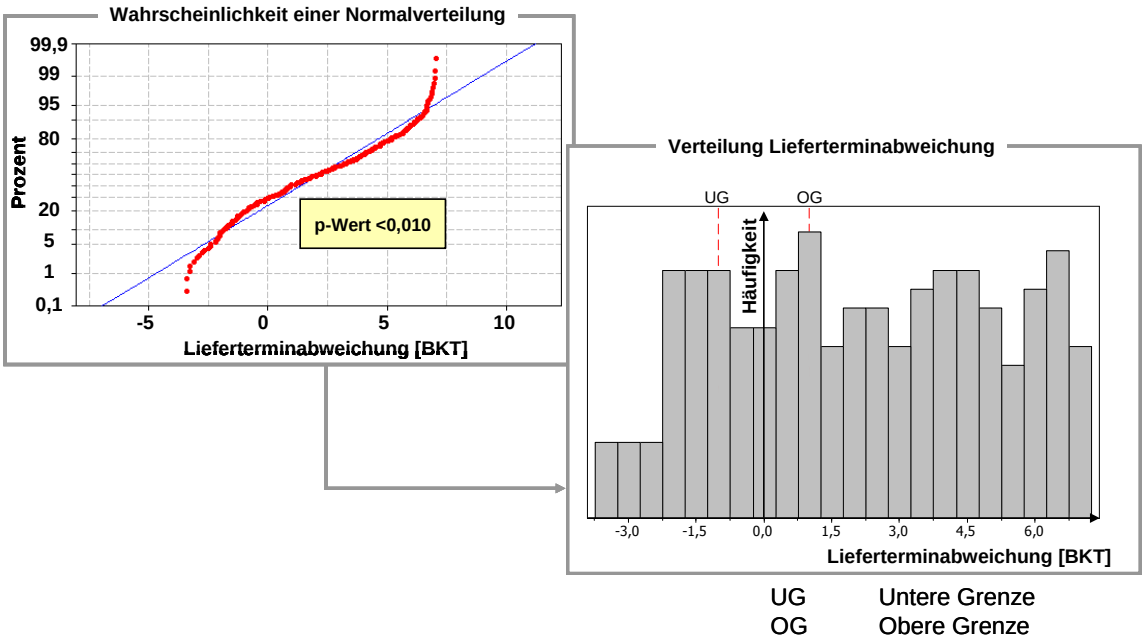


Bild 8-13: Verteilung der Lieferterminabweichung

Bei diesem Test wird die empirische kumulative Verteilungsfunktion der Stichprobendaten mit der Verteilung verglichen, die zu erwarten ist, wenn die Daten normalverteilt wären. Wenn diese beobachtete Differenz bedeutend groß ist, verwirft der Test die Wahrscheinlichkeit, dass die Grundgesamtheit normalverteilt ist [GIG99]. Hierfür wird zuerst ein Alpha-Niveau (a) ausgewählt, das i. d. R. 0,05 beträgt. Dann wird der sogenannte p-Wert berechnet, der sich zwischen 0 und 1 erstreckt. Je kleiner der p-Wert ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass die betrachtete Messreihe normalverteilt ist. Für die Berechnung dieses Werts wird auf die Literatur [GIG99] verwiesen. Nach der Berechnung des p-Werts wird er mit dem Alpha-Niveau (a) verglichen. Wenn der p-Wert kleiner als 0,05 (das ausgewählte Alpha-Niveau) ist, dann sind die betrachteten Messdaten nicht normalverteilt.

Die Ergebnisse in Bild 8-13 zeigen, dass die Lieferterminabweichung in den ersten drei Monaten nicht normalverteilt war.

Das auf der linken Seite von Bild 8-13 dargestellte Ergebnis des Kolmogorov-Smirnov-Tests zeigt einen p-Wert kleiner als 0,01, was bedeutet, dass die Daten der Lieferter-

mintreue nicht normalverteilt waren. Die Grafik rechts im gleichen Bild zeigt die gemessene Verteilung der Lieferterminabweichung im ersten Quartal und verdeutlicht, dass die Messdaten keiner Normalverteilung entsprechen.

Daraus wird abgeleitet, dass diese Zielgröße aus logistischer Sicht nicht beherrscht war. Deshalb sollen im Folgenden basierend auf der Versuchsplanung die Planparameter angepasst werden, um die Liefertermintreue zu verbessern.

Wie in Kapitel 6.2 beschrieben, erfolgt die Adaptation der Planparameter mit Hilfe einer simulationsbasierten Versuchsplanung. Der erste Schritt hierbei ist die Ermittlung sämtlicher möglichen Ursachen, die zu einer schlechten Liefertermintreue führen. Mit Hilfe eines Ishikawa-Diagramms wurden die potenziellen Verursacher der gemessenen schlechten Lieferleistung ermittelt. Um eine bessere Übersichtlichkeit zu ermöglichen, sind die relevanten Ursachen in Tabelle 8-6 in den fünf Kategorien Methode, Material, Maschine, Mensch und Milieu zusammengefasst.

Tabelle 8-6: Ursachen zur niedrigen Liefertermintreue

<table>
<tr><th>Methode/Verfahren</th><th>Material/Daten</th><th>Mensch</th></tr>
<tr><td rowspan="3">• Planwert Auftragsdurchlaufzeit (ZDA_m)
• Methode zur Berechnung der Losgröße
• Verfahren zur Reihenfolgeplanung
• Zeitpunkt Auftragsfreigabe
• Probleme bei der Materialbereitstellung (seitens des Lieferanten)
• Unrealistische Liefertermine (falsche Methoden zur Absatzplanung, falsche Terminierung)
• Falsche Modellierung des Kunden bzw. Lieferanten
• Berechnung des Mindestbestands</td><td>• Falsche Messpunkte
• Falsch berechnete Kennzahlen
• Qualität der Rückmeldedaten</td><td>• Qualifikation der Mitarbeiter
• Kapazitäten von Mitarbeitern
• Rückmeldedisziplin</td></tr>
<tr><th>Maschine</th><th>Milieu</th></tr>
<tr><td>• Lange Taktzeitabweichung
• Lange Rüstzeitabweichung
• Schneller Werkzeugverschleiß (Standmenge der Werkzeuge)
• Qualitätsmängel der Maschinen
• Ausfälle
• Hohe Ausschussraten</td><td>• Ungeplante Betriebsunterbrechungen</td></tr>
</table>

Im nächsten Schritt wurde mit Hilfe einer Sensitivitätsmessung die Anzahl der wichtigsten Parameter reduziert. Mit der Sensitivitätsmessung wurde die Variation der Liefertermintreue in Abhängigkeit von den einzelnen Parametern geprüft. In unterschiedli-

chen Simulationsversuchen wurden die relevanten Parameter aus Tabelle 8-6 einzeln verändert und die Liefertermintreue erneut gemessen. Je stärker der neue vom ursprünglich gemessenen Wert (78 %) abweicht, desto größer ist der Parametereinfluss auf den Zielwert (Liefertermintreue).

Tabelle 8-7: Sensitivitätsanalyse

Planparameter	Wert Initial (Referenz)	Wert Neu	LTT neu [%]
Planwert Auftragsdurchlaufzeit (ZDAm) [BKT]	3,36	2,88	82,9 %
Losgröße [-]	3.000	6.000	81,6 %
Standmenge [-]	4.000	6.000	79,4 %
Reihenfolgeplanung	FIFO	Rüst	79,7 %
Kundenmodell	$\alpha = 50$ $\beta = 25$	$\alpha = 40$ $\beta = 20$	78,8 %
Lieferantenmodell	$\mu_{LM} = 2$ $\sigma_{LM} = 4$ $\mu_{LT} = 2$ $\sigma_{LT} = 5$	$\mu_{LM} = 1$ $\sigma_{LM} = 3$ $\mu_{LT} = 1$ $\sigma_{LT} = 3$	78,9 %
Mindestbestand an Fertigprodukten [-]	3.500	4.500	79,1 %
Rüstzeit [min]	45	30	78,6 %
Technische Verfügbarkeit	85 %	90 %	78,7 %
Ausschussrate	3 %	1 %	78,3 %

LTT Liefertermintreue [%]
μLM mittlere Liefermengenabweichung [%]
σLM Standardabweichung der Liefermengenabweichung [%]
μLT mittlere Lieferterminabweichung [BKT]
σLT Standardabweichung der Lieferterminabweichung [BKT]
NF Veränderung der Marktnachfrage [%]
α Konfigurationsparameter „Fehlmengenausgleich“ [%]
β Konfigurationsparameter „Lieferschwankungsausgleich“ [%]

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse (Tabelle 8-7) zeigte, dass die Plan-Auftragsdurchlaufzeit, die eingestellte Losgröße, die Methode zur Reihenfolgenbildung und die Standmenge der Schmiedewerkzeuge die Parameter mit dem größten Einfluss auf die Liefertermintreue sind.

Im nächsten Schritt der Planparameteradaptation erfolgte die Erstellung des Versuchsplans. Hierfür wurden zuerst für jeden Parameter zwei Einstellungen festgelegt (Tabelle 8-8), und die Matrix des Versuchsplans wurde anschließend definiert (Tabelle 8-9).

Tabelle 8-8: Parametereinstellungen

Parameter		„+“ Einstellwert	„-„ Einstellwert
A	Planwert Auftragsdurchlaufzeit	3,36 BKT	1,46 BKT
B	Reihenfolgeregel	FIFO Prinzip	Rüstzeitminimierend
C	Losgröße	3000 Stück/ Los	6000 Stück/ Los
D	Werkzeugstandmenge	6000 Stück	4000 Stück

Gemäß der Versuchsplanmatrix wurden anschließend die einzelnen Versuche durchgeführt. Um genauere Ergebnisse zu erzielen, wurde jeder Simulationsversuch fünf Mal durchgeführt, und der Mittelwert der gemessenen Liefertermintreue (LTT) wurde in die Spalte „Zielwert“ eingetragen. Abschließend wurden mit Hilfe der sogenannten Reaktionstabelle (Tabelle 8-10) die entscheidenden Parameter identifiziert, die zum Zweck der Verbesserung der Liefertermintreue angepasst werden sollten.

Tabelle 8-9: Matrix des Versuchsplans

Versuchs-Nr.	Parameter				2-Faktor-Wechselwirkung						3-Faktor-Wechselwirkung			Zielwert
	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ABD	BCD	LTT [%]
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	81
2	+	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	79
3	+	+	-	+	+	-	+	-	+	-	-	+	-	81
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	+	-	-	+	73
5	+	-	+	+	-	+	+	-	-	+	-	-	-	79
6	+	-	+	-	-	+	-	-	+	-	-	+	+	78
7	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	-	+	80
8	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	74
9	-	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	78
10	-	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	76
11	-	+	-	+	-	+	-	-	+	-	+	-	-	64
12	-	+	-	-	-	+	+	-	-	+	+	+	+	63
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	+	-	+	-	78
14	-	-	+	-	+	-	+	-	+	-	-	-	+	72
15	-	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+	+	+	64
16	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	-	-	61

A Plandurchlaufzeit B Reihenfolgeplanung C Losgröße D Werkzeugstandmenge

Die Reaktionstabelle hat die gleichen Spalten wie der Versuchsplan. In der zweiten Tabellenzeile wurde für jeden Parameter die Summe der gemessenen Zielwerte bei der positiven Parametereinstellung berechnet. Für den Parameter A (Planwert Auftragsdurchlaufzeit) z.B. wurde ein Wert gleich 625 berechnet. Dieser Wert entspricht der Summe der gemessenen Zielwerte der ersten acht Simulationsversuche aus dem Versuchsplan. In der dritten Zeile der Reaktionstabelle wurde dagegen die Summe aller Zielwerte bei der negativen Einstellung aller Parameter sowie Parameterkombinationen

eingetragen. Für den gleichen Parameter A wurde ein Wert gleich 556 berechnet. Dieser Wert entspricht der Summe der gemessenen Zielwerte der Simulationsversuche 9 bis 16 aus dem Versuchsplan. In der vierten und letzten Zeile wird jeweils die Differenz aus der zweiten und dritten Zeile berechnet. Diese Differenz hat die gleiche Messeinheit wie der Zielwert aus dem Versuchsplan. Je größer die berechnete Differenz, desto höher ist die Parameterrelevanz für den Zielwert.

Tabelle 8-10: Reaktionstabelle für obere und untere Parametereinstellung

Parameter	A	B	C	D	AB	AC	AD	BC	BD	CD	ABC	ACD	BCD
+ Wert	625	595	621	605	589	569	593	593	589	587	566	595	589
- Wert	556	586	560	576	592	612	588	588	592	594	615	586	592
Differenz	**69**	9	**61**	29	3	43	5	5	3	7	49	9	3

größte Differenz und somit größter Einfluss auf Zielgröße

Die simulationsbasierte Versuchsplanung zeigte, dass die Plan-Auftragsdurchlaufzeit (Parameter A) mit einem Differenzwert von 69 den höchsten Einfluss auf die Liefertermintreue (Zielwert) hatte (Versuchsreihe bzw. Spalte A). Fast genauso entscheidend war die eingestellte Losgröße (Versuchsreihe bzw. Spalte C). Die Reaktionstabelle bewies auch, dass die Wechselwirkung zwischen diesen beiden Parametern von großer Relevanz für die Erreichung einer guten Liefertermintreue war (Versuchsreihe bzw. Spalte AC). Die Planung der Fertigungsreihenfolge, ob nach dem FIFO-Prinzip oder rüstzeitminimierend, sowie die Standmenge der Schmiedewerkzeuge wirkten sich auch auf die Liefertermintreue aus. Dennoch war deren Einfluss nicht so bedeutend im Vergleich zu den anderen zwei Parametern.

Der letzte Schritt der Planparameteradaptation zielte auf eine Neueinstellung des Parameters „Plan-Auftragsdurchlaufzeit“ ab.

Je nach eingestellter Fertigungslosgröße wird die Plan-Auftragsdurchlaufzeit eingestellt. Die Parametereinstellungstabelle (Tabelle 8-8) zeigt, dass diese Plangröße zwischen 1,46 und 3,36 BKT variieren kann.

Wird mit einer kurzen Plan-Auftragsdurchlaufzeit terminiert, so kann dies zu unrealistischen Fertigstellungsterminen der Fertigungsaufträge führen, was in einer Erhöhung der Terminabweichung im Abgang und somit in einer Verschlechterung der Liefertermintreue resultiert. Wird dagegen mit einer längeren Plan-Auftragsdurchlaufzeit geplant, so können die Fertigungsaufträge termingerecht abgefertigt werden, und es wird eine gute Liefertermintreue erreicht. Dies kann aber auch in einer späten Auftragsfreigabe resultieren, was große Auslastungsverluste an den Arbeitssystemen verursachen kann.

Aus diesen Gründen war eine Positionierung zwischen beiden Grenzwerten der Plan-Auftragsdurchlaufzeit anzustreben. Es wurde hierzu zuerst die Plan-Auftragsdurchlaufzeit auf 3,36 BKT eingestellt (Parametereinstellung „Plus“ aus der Einstellparametertabelle in Tabelle 8-8). Dieser Parameter wurde anschließend in kleineren Schritten nach unten variiert, und die Simulation wurde neu gestartet. Dies wurde so oft wieder-

holt, bis die Parametereinstellung „Minus“ aus der Einstellparametertabelle erreicht wurde. Die Liefertermintreue wurde dabei jedes Mal neu gemessen und anschließend grafisch als Funktion der Plan-Auftragsdurchlaufzeit dargestellt (Bild 8-14).

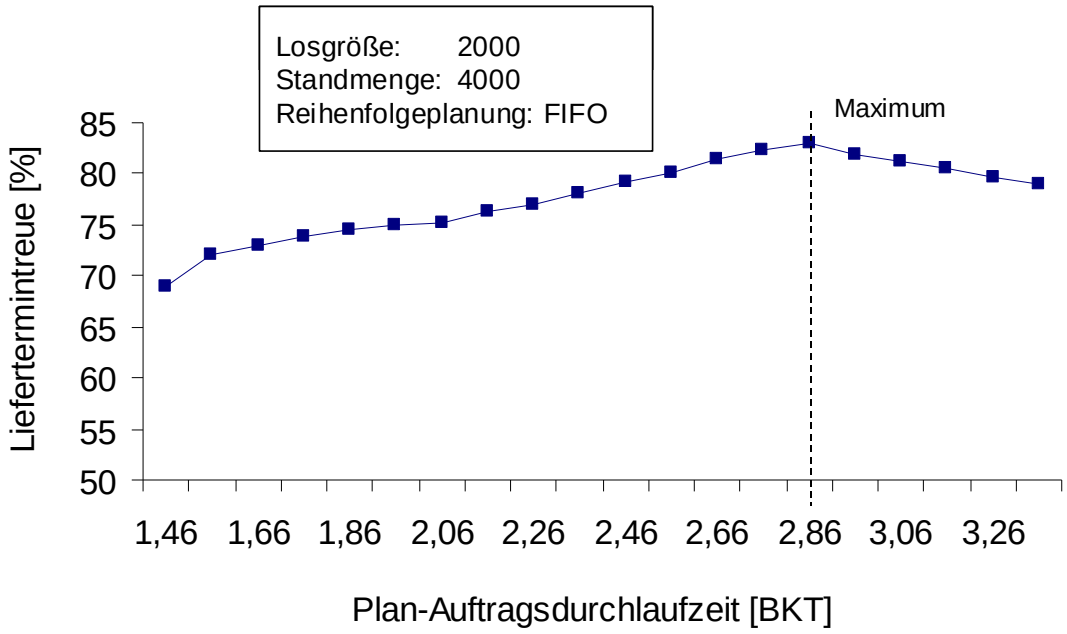


Bild 8-14: Verlauf der Termintreue in Abhängigkeit von der Plan-Auftragsdurchlaufzeit

Der höchste Wert der gemessenen Liefertermintreue (82,9 %) wurde erreicht, als die Plan-Auftragsdurchlaufzeit auf 2,86 BKT eingestellt wurde. Dieser neue Wert wurde abschließend in der Planungskomponente von SiMPL eingestellt.

Die Ergebnisse der Planparameteradaptation stellten in diesem Beispiel darüber hinaus eine Anforderung aus logistischer Sicht an die Technologie. Denn damit die Plan-Auftragsdurchlaufzeit 2,86 BKT betragen kann, müssen weitere technologische Parameter verbessert werden. In Kapitel 5.1 wurden die Zusammenhänge zwischen den PPS- und den technologischen Parametern untersucht. Aus der Zusammenhangmatrix in Bild 5-13 lässt sich ablesen, dass die Auftragsdurchlaufzeit von der Taktzeit, technischen Verfügbarkeit der Anlagen, der produzierten Ausschussmenge, der technisch bedingten Wartezeit, der Rüstzeit sowie der Standmenge der Werkzeuge abhängt. Eine Anpassung der PPS-Parameter im System kann somit erst wirksam sein, wenn die Technologieabteilung zur Verbesserung der relevanten technologischen Parameter beiträgt. Hiermit wird die Wichtigkeit einer simultanen Adaptation der logistischen und technologischen Parameter gezeigt.

Mit Hilfe der Produktionskennlinien kann abschließend die Parameteradaptation auf ihre Wirksamkeit geprüft werden. Ähnlich wie bei Bild 8-8, das den Betriebspunkt der Schmiedepresse zeigt, werden in Bild 8-15 die erwarteten Leistungs- und Durchlaufzeitkennlinien sowie der erwartete Betriebspunkt nach der Anpassung der Plan-Auftragsdurchlaufzeit dargestellt. Der zu erwartende Betriebspunkt zeigt vor allem eine Leistung von 19,6 Std/BKT und entspricht somit einer Auslastung von 93%. Diese hö-

here Auslastung würde in einer höheren Ausbringung resultieren. Somit könnte eine bessere Liefertermintreue erzielt werden.

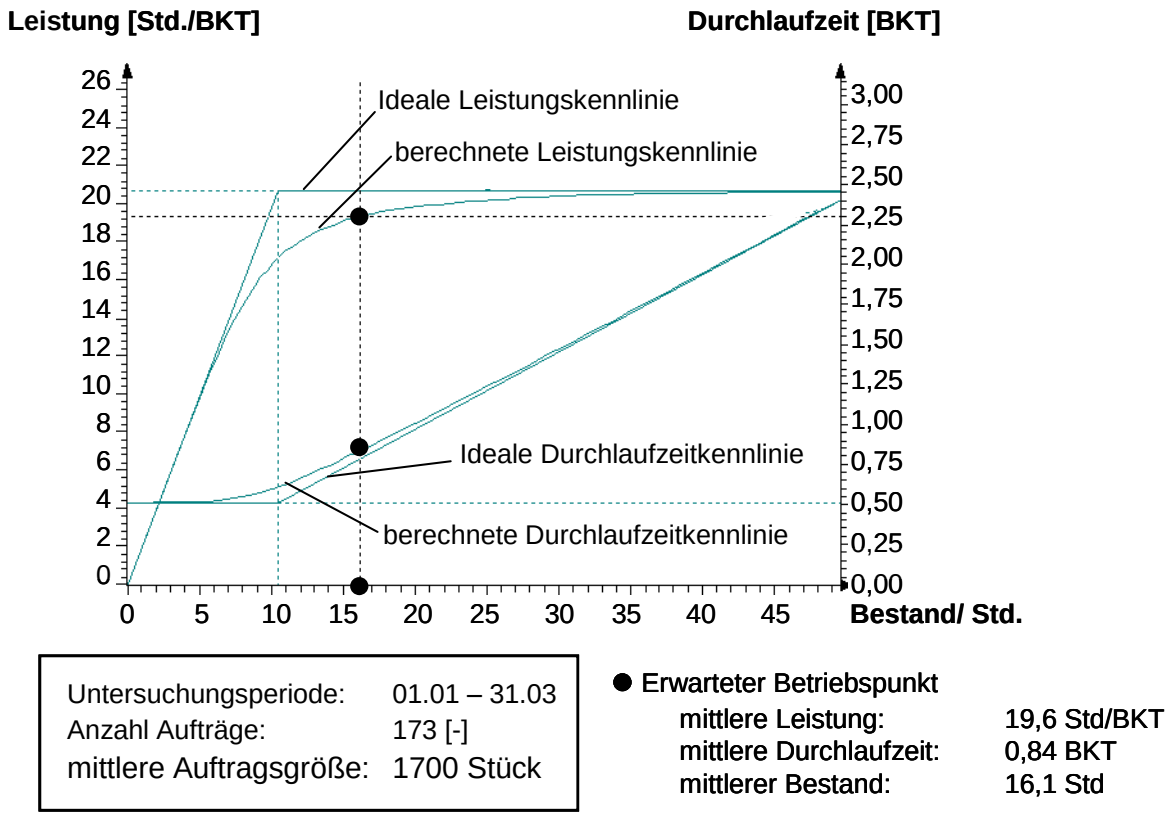
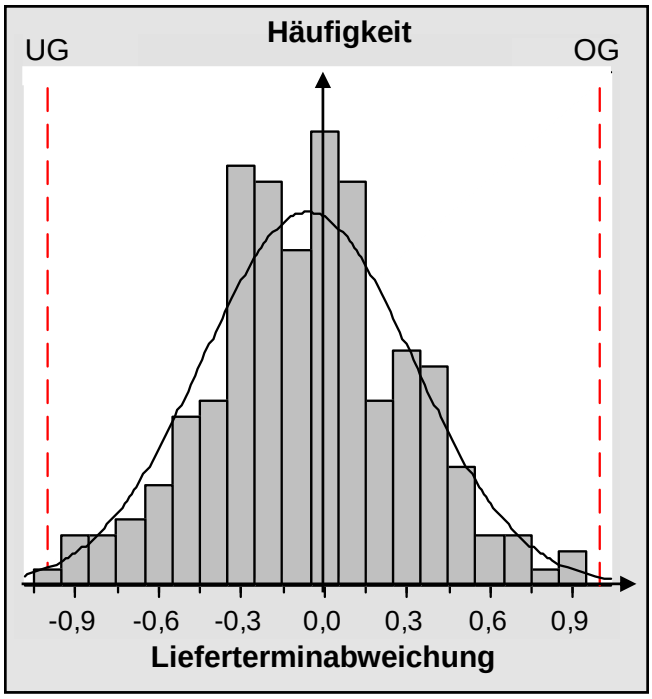


Bild 8-15: Erwartete Produktionskennlinien der Schmiedepresse nach Adaptation der PPS-Parameter

Mit der neuen Parametrierung der Plan-Auftragsdurchlaufzeit wurde auf die im ersten Kalenderquartal gemessene, niedrige Liefertermintreue reagiert. Nach dem Ablauf der zweiten Simulationsperiode wurde eine deutliche Verbesserung dieses Zielwerts gemessen. Dennoch blieb die erzielte Liefertermintreue von 83,24 % unter dem vorgegebenen Ziel von 95 %. Deshalb wurden die oben beschriebenen Schritte zur Adaptation der Planparameter erneut durchgeführt, und eine weitere Verbesserung konnte am Ende des dritten Quartals gemessen werden. Bis auf die Einstellung der Plan-Auftragsdurchlaufzeit auf den ermittelten Wert von 2,86 BKT blieben dabei die weiteren Parameter gleich wie in der ersten Untersuchungsperiode.

Bild 8-16 zeigt die Verteilung der Lieferterminabweichung am Ende des zweiten Quartals sowie die relevanten Kenngrößen.



Zeitraum	01.04 – 30.06
Anzahl Aufträge	228
Mittle Auftragsgröße [Stück]	1226
Standard-abweichung [Stück]	589
Bestellmenge [Stück]	279714

Messergebnisse

LTT	83,24%
LTAm	-0,06 BKT
LTAs	0,38 BKT
Cp	0,88
Cpk	0,82

LTT	Liefertermintreue	Cp	Prozessfähigkeit
LTAm	mittlere Lieferterminabweichung	Cpk	Prozesskennwert
		UG	Untere Grenze
LTAs	Standardabweichung Lieferterminabweichung	OG	Obere Grenze

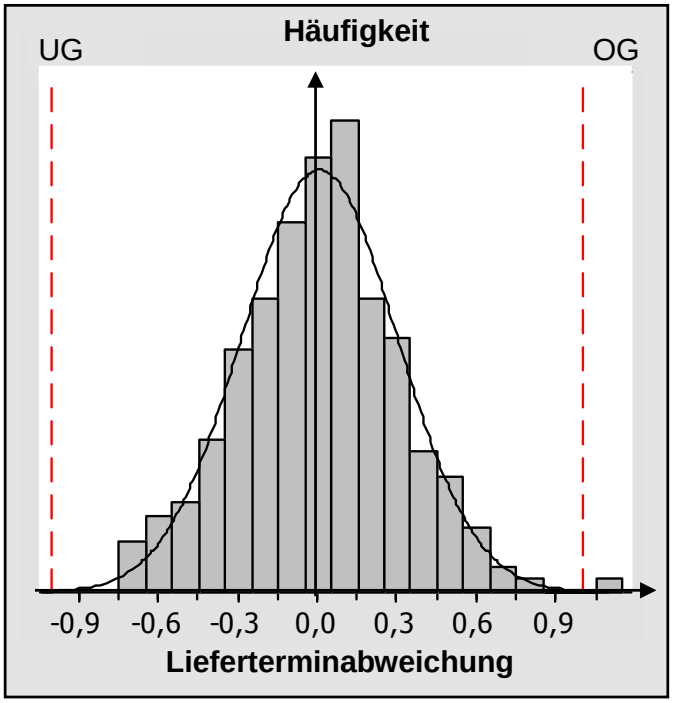
Bild 8-16: Verteilung der Lieferterminabweichung am Ende des zweiten Quartals

Im zweiten Jahresquartal wurden 189 der 228 Bestellaufträge termin- und mengengerecht ausgeliefert. Die Lieferterminabweichung betrug durchschnittlich -0,06 BKT und schwankte mit einer Standardabweichung von 0,38 BKT. Der Kolmogorov-Smirnov-Test zeigte, dass die gemessenen Werte der Lieferterminabweichung normalverteilt waren. Der Prozessfähigkeitswert C_p betrug dabei 0,88. Auch wenn eine deutliche Verbesserung der Liefertermintreue erreicht wurde, blieb diese immer noch unter dem vordefinierten Ziel. Deshalb sollte der ganze Prozess der Planparameteradaptation wiederholt werden.

Die Versuchsplanung hat in diesem zweiten Fall gezeigt, dass die Fertigungslosgröße den größten Einfluss auf die Liefertermintreue hatte.

Der Versuchsplanungsschritt „Parameteroptimierung“ ergab, dass die Liefertermintreue den höchsten Wert bei einer Fertigungslosgröße von 4250 erreichen wird. Aus dieser Erkenntnis wird eine weitere logistische Anforderung an die „Technologieabteilung“ abgeleitet. Weil die aktuelle Standmenge des Schmiedewerkzeugs nur 4000 beträgt, soll der Werkzeugverschleiß soweit verbessert werden, dass mindestens eine Standmenge von 4250 erreicht wird. Eine alleinige Planung mit der neu ermittelten Fertigungslosgröße ohne Entwicklung der Standmenge würde kaum zu einer Verbesserung der Logistikleistung führen. Grund dafür ist die Notwendigkeit einer Umrüstung innerhalb eines Fertigungsauftrags wegen Werkzeugverschleißes.

Nach Einstellung der Losgröße auf 4.250 Stück konnten am Ende des dritten Quartals die Ergebnisse in Bild 8-17 erreicht werden.



Zeitraum	01.07 – 30.09
Anzahl Aufträge	257
Mittle Auftragsgröße [Stück]	1270
Standard-abweichung [Stück]	582
Bestellmenge [Stück]	326557

Messergebnisse

LTT	96%
LTAm	-0,006 BKT
LTAs	0,29 BKT
Cp	1,14
Cpk	1,13

LTT	Liefertermintreue	Cp	Prozessfähigkeit
LTAm	mittlere Lieferterminabweichung	Cpk	Prozesskennwert
		UG	Untere Grenze
LTAs	Standardabweichung Lieferterminabweichung	OG	Obere Grenze

Bild 8-17: Verteilung der Lieferterminabweichung am Ende des dritten Quartals

Im dritten Jahresquartal wurden 257 Kundenaufträge durchschnittlich 0,006 BKT zu früh ausgeliefert. Die Lieferterminabweichung schwankte dabei um 0,29 BKT. 246 der 257 und somit 96 % der Aufträge wurden termintreu ausgeliefert. Der logistische Prozess war somit stabiler, was in einem Prozessfähigkeitswert von 1,14 resultierte.

Die Zielvorgabe von 95% Liefertermintreue wurde somit erreicht, und es bedarf am Ende dieser Untersuchungsperiode keiner erneuten Planparameteradaptation.

8.2.3 Diskussion der Ergebnisse

8.2.3.1 Zusammenfassung

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Simulationsumgebung bot eine bedeutende Unterstützung bei der Gestaltung der aus der Technologieänderung resultierenden Prozesskette. Dank ihrer generischen und modularen Bauweise konnten unterschiedliche Modelle schnell und einfach aufgebaut und hinsichtlich der Erreichung der Logistikziele miteinander verglichen werden. Dank der Modellierung unterschiedlicher Lieferanten und des Kundenverhaltens konnten darüber hinaus die logistischen Grenzwerte sowie das Potenzial der aus der neuen Technologie resultierenden Prozesskette ermit-

telt werden. Abgeleitet aus dem ermittelten Potenzial wurden die Logistikziele der neuen Prozesskette definiert.

Um dieses Potenzial ausschöpfen zu können, wurde die entwickelte Methode zur adaptiven Planparameteradaptation angewendet. Dank dieser Methode konnte z. B. die Liefertermintreue sukzessiv verbessert werden. Nach einem ersten Adaptationsvorgang der Planparameter konnte die Liefertermintreue um 5,4 % erhöht werden. Nach einer zweiten Parameteradaptation konnte diese Zielgröße um weitere 15,3 % auf 96% erhöht werden.

Die Simulationsversuche haben des Weiteren gezeigt, dass während der Wachstumsphase der neuen Technologie die Plan-Auftragsdurchlaufzeit und die Fertigungslosgröße die entscheidenden Parameter zur Erreichung der Logistikziele waren.

Die entscheidende Rolle dieser beiden Planparameter ist darauf zurückzuführen, dass sowohl die Plan-Auftragsdurchlaufzeit als auch die Fertigungslosgröße direkt vom Produktionsvolumen abhängen. Während der Wachstumsphase einer neuen Technologie ist dieses Volumen nämlich nicht konstant und steigt im Laufe der Zeit. Deshalb ist eine kontinuierliche und regelmäßige Anpassung der davon abhängenden Planparameter zwingend erforderlich.

Wird die adaptive mit der konventionellen Produktionsplanung und -steuerung verglichen, so ist deutlich zu sehen, dass die Adaptation von Planparametern im PPS-System zu einer schnelleren logistischen Beherrschung der neuen Technologie führt. Während mit der konventionellen Planung der Produktion die logistischen Ziele bis zum Ende des Jahres nicht erreicht wurden, wäre es mit der erarbeiteten Methode zur Planparameteradaptation möglich, diese kontinuierlich zu verbessern und neun Monate nach der ersten Einführung der neuen Technologie komplett zu erfüllen.

Zuletzt konnten aus der Adaptation der logistischen Parameter Anforderungen an die Technologie abgeleitet werden. Die Erfüllung dieser Anforderungen und somit Weiterentwicklung der neuen Technologie trugen zur Erreichung der logistischen Ziele bei. Diese Anforderungen betrafen hauptsächlich die Standmenge der Werkzeuge sowie die Rüst- und technisch bedingte Wartezeit.

8.2.3.2 Fazit

Die konventionellen „Ein-Weg“-Simulationsmodelle sollen in der Zukunft durch modular aufgebaute und generische Simulationsumgebungen ersetzt werden. Die Auslegung und Dimensionierung von neuen Prozess- und Lieferketten bedarf schnell anpassbarer und wandlungsfähiger Simulationsmodelle, um möglichst schnell und effizient unterschiedliche Szenarien zu testen. Vor allem in den frühen Phasen des Technologielebenszyklus wird nach den logistischen Grenzwerten und dem Potenzial gesucht. Deshalb sollen zahlreiche Gestaltungsszenarien simuliert und evaluiert werden. Das Simulationsmodell soll daher mit einem überschaubaren Aufwand bei der Gewinnung dieser Erkenntnisse unterstützen.

Darüber hinaus ist eine adaptive Produktionsplanung und -steuerung entscheidend während der Wachstumsphase einer neuen Technologie, um das damit verbundene logistische Potenzial auszuschöpfen. Die adaptive Produktionsplanung und -steuerung

zielt darauf ab, die logistischen Ziele eines produzierenden Unternehmens schon während der frühen Phasen des Technologielebenszyklus zu erreichen und somit die Produktionsabläufe logistisch zu beherrschen. Des Weiteren definiert sie Anforderungen aus logistischer Sicht an die Technologie. Die Erfüllung dieser Anforderungen und somit Weiterentwicklung der neuen Technologie trägt zur Erreichung der vordefinierten logistischen Ziele bei.

Eine kontinuierliche simultane Adaption der technologischen und logistischen Parameter ist somit der Schlüssel zur schnellen Beherrschung der logistischen Prozesse bei der Einführung einer neuen Technologie.

9. Zusammenfassung und Ausblick

Der hart umkämpfte Absatzmarkt zwingt Unternehmen, stets neuartige Fertigungsprozesse und -abläufe zu erforschen. Der Bedarf an neuen, wirtschaftlichen Fertigungsverfahren mit kurzen Bearbeitungszeiten sowie die hohen Anforderungen an die Produktqualität rücken innovative Technologien dabei erneut in den Mittelpunkt der Forschung. Produzierende Unternehmen sehen sich immer wieder gezwungen, konventionelle durch neuartige Technologien zu ersetzen. Neben der wirtschaftlichen und technischen Machbarkeit muss die neue Technologie aber auch logistische Anforderungen erfüllen können, weil Lieferzeit und Liefertreue zu einem wichtigen Wettbewerbsfaktor aufgestiegen sind.

Die vorliegende Arbeit untersucht die Zusammenhänge zwischen einer neuen Technologie und der Logistik. Mit Hilfe der Korrelationsanalyse sowie basierend auf analytischen Untersuchungen werden die Wechselwirkungen zwischen den technologiespezifischen Merkmalen einer neuen Schmiedetechnologie und den Parametern zur Produktionsplanung und -steuerung identifiziert.

Darüber hinaus wird der Technologielebenszyklus durchleuchtet. Daraus werden logistische Aufgaben erkannt, die für die Beherrschung der neuen Technologie während der einzelnen Lebenszyklusphasen relevant sind. Dabei werden hauptsächlich die frühen Phasen betrachtet. Hierfür werden Methoden entwickelt, die zur Durchführung der relevanten logistischen Aufgaben dienen.

Für die logistische Erprobung der neuen Technologie während der Entstehungsphase wird eine simulationsbasierte Methode vorgestellt, welche die Gestaltung der infolge der Technologieänderung resultierenden Produktionsprozesse unterstützt. Es werden dabei die innerbetriebliche Prozesskette sowie die überbetriebliche Lieferkette untersucht. Hierfür wird ein modulares Simulationsmodell benutzt, welches generisch aus dem Datenbestand aufgebaut wird. Dadurch kann das Simulationsmodell mit geringem Aufwand unterschiedliche Prozess- und Lieferkettenmodelle auf ihre Wirksamkeit erproben. Ziel der Methode ist es, die Prozess- und Lieferkette bei einer Änderung der technologischen Parameter neu zu strukturieren und zu dimensionieren. Es wird dadurch ermöglicht, dass die verschiedenen aus der Technologieimplementierung resultierenden Prozessketten effizient variiert, simuliert und logistisch miteinander verglichen werden können.

Während der Wachstumsphase, die durch hohe Dynamik und Komplexität geprägt ist, ist eine adaptive Methode zur Produktionsplanung und -steuerung von großer Bedeutung. Aufbauend auf dem Ansatz der Versuchsplanung wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methode für die Adaptation der Planparameter im PPS-System entwickelt. In Abhängigkeit von der Technologieentwicklung wird damit die Parametereinstellung kontinuierlich angepasst. Aus der Parameteradaptation werden darüber hinaus logistische Anforderungen an die neue Technologie (wie z. B. Standmenge der Werkzeuge oder Prozesssicherheit) abgeleitet. Dadurch werden die logistischen Ziele nach der ersten Einführung der neuen Technologie schneller erreicht und somit die neue Technologie logistisch beherrscht.

Die entwickelten Methoden wurden am Beispiel der technologischen Innovation „Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung“ erprobt. Diese neue Technologie ersetzt das konventionelle Schmieden von Langteilen.

Im ersten Schritt wurde das Simulationsmodell zur Umstrukturierung der schmiedetechnischen Prozesskette verwendet. Es wurden drei unterschiedliche Szenarien des Layouts angenommen, die im Hinblick auf die Erreichung der logistischen Ziele miteinander verglichen wurden. Im zweiten Schritt wurde anschließend das beste Szenario simulativ in Betrieb genommen, und die Methode zur adaptiven Planung und Steuerung der Produktion wurde getestet.

Die systematischen Simulationsversuche haben gezeigt, dass allein die Substitution der konventionellen durch die neue Technologie nicht zur Erreichung der vorgeschriebenen logistischen Ziele ausreicht, da offene logistische Potenziale unausgeschöpft blieben.

So ergaben die Simulationsergebnisse, dass nur 68 % des jährlichen Ausbringungspotenzials produziert werden können, wenn die PPS-Parameter einmalig eingestellt werden und im Laufe des Jahres nicht periodisch angepasst werden. Die Untersuchungen ergaben auch, dass bei gleichen Konditionen eine Liefertermintreue von 78 % nicht überschritten werden kann. Weil das Produktionsvolumen bei der Neueinführung einer Technologie kontinuierlich im Laufe des Jahres steigt, einige technische Parameter wie z. B. die Standmenge der Werkzeuge in den frühen Phasen des Technologielebenszyklus noch nicht konstant sind und weil viele Planparameter wie z. B. die Auftragsdurchlaufzeit oder die Fertigungslosgröße davon abhängen, war die kontinuierliche Anpassung dieser Parameter zwingend erforderlich, um die offenen Potenziale ausschöpfen zu können. Nach der Anpassung der entsprechenden Planparameter im PPS-System verbesserte sich die Liefertermintreue um 18 % von 78% auf 96%, und die theoretisch maximale jährliche Ausbringung konnte zu 91 % erzielt werden.

Diese Arbeit hat somit die Wichtigkeit der simultanen Adaptation der technologischen und logistischen Planparameter gezeigt. Nur über eine kontinuierliche Anpassung dieser Parameter werden die logistischen Prozesse bei der Einführung einer neuen Technologie schnell beherrscht. Dennoch müssen diese Methoden kritisch diskutiert werden.

Auch wenn aufgrund der Untersuchungen vermutet werden darf, dass die adaptive Produktionsplanung und -steuerung zu einem schnelleren Ausschöpfen des mit der neuen Technologie gebundenen Potenzials führt, bleibt der Vorbehalt, dass die Validierung nur simulativ durchgeführt worden ist. An dieser Stelle wäre zu wünschen, die Methoden erneut zu validieren, wenn das Präzisionsschmieden mit integrierter Wärmebehandlung die reale Wachstumsphase erreicht. Es wäre ebenso denkbar, wenn die entwickelten Methoden am Beispiel einer anderen innovativen Technologie erprobt werden. In diesem Fall kann ihre Übertragbarkeit auf andere Technologien ebenfalls validiert werden.

Darüber hinaus ist eine Erweiterung der Monitoringkomponente um ein proaktives Risikomanagement vorteilhaft. Dadurch wird ermöglicht, potenzielle Zielabweichungen bereits vor ihrem Auftreten zu behandeln.

Ein weiterer vielversprechender Ansatzpunkt für die Methodenweiterentwicklung ist die Implementierung der ganzen Methode zu einem „End-User“-Tool. Eine Konkretisierung

dieses Ansatzes hätte den Rahmen dieser Arbeit überstiegen, da die theoretische Entwicklung der Methoden im Vordergrund stand.

10. Literaturverzeichnis

[ABD02] Abdelfattah, S.: Thixoschmieden im geschlossenen Gesenk zur Herstellung komplexer Stahlbauteile. Dissertation Universität Hannover, Elektronische Ausgabe, http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01dh01/356615847l.pdf, Hannover 2002.

[ADA98] Adam, D. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement – Schriften zur Unternehmensführung. Band 61, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998.

[ADE05] Ade, H.: Marktlage und -entwicklung in der Massivumformung. In Schmiede-Journal, (2005) 9, S. 12-13.

[ADL05] Adlof, W.: Potenziale massivumgeformter Bauteile. In: Schmiede-Journal, (2005) 3, S. 11-14.

[ALT06] Altmann, H.-C.: Beitrag zum Präzisionsschmieden von Kurbelwellen. Dissertation Universität Hannover, Berichte aus dem IFUM, Band 04/2006, PZH Verlag, Hannover, 2006.

[ARN04] Arndt, J.: Neue AFP-Stähle für Hochbeanspruchte Fahrwerkteile. In: Schmiede-Journal, (2004) 3, S. 17-18.

[AUR04] Aurich J. C.; Barbian, P.; Naab, C.: Produktionsstrategie im Produktlebenszyklus. In: ZWF, Jahrgang 99 (2004) Heft 5, S. 218-222.

[AUR05] Aurich, J. C.; Barbian, P. ; Naab, C. : Multiprojektmanagement in der projektorientierten Produktion – Gestaltung und Lenkung der Projektlandschaft in der Produktion. In: wt Werkstattstechnik, Jahrgang 95 (2005) Heft 1/2, S. 19-24.

[BAC06] Bach, F.-W; Schaper, M.; u. a.: Simulation des Abschreckhärtens mittels Spraykühlung – Wärmeübergang, Gefüge und Härte. In: Härterei-Technische-Mitteilungen, Band. 61 (2006), Nr. 3, S. 142-147.

[BAI02] Baier, J.; Glötzel, S.: Validierung einer Materialflusssimulation in der innerbetrieblichen Logistik. In: ZWF, Jahrgang 97 (2002) Heft 1/2, S. 51-56.

[BAN08] Bangsow, S.: Fertigungssimulation mit plant Simulation und Simtalk - Anwendung und Programmierung mit Beispielen und Lösungen. Hanser Verlag, München, 2008.

[BAS07] Bass, I.: Six Sigma Statistics with Excel and Minitab. McGraw-Hill Verlag, Maidenhead (UK), 2007.

[BEC84] Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 2, Nr. 70, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1984.

[BEH07] Behrens, B.-A.; Reinsch, S.; Daehndel, H. u. a.: Precision forging processes for high-duty automotive components. In: Journal of Materials Processing Technology, 04, 2007, pp. 139-146.

[BER00] Bergmann, G.: Innovation – Kompakt-Training praktische Betriebswirt-

schaft. Kiehl Verlag, Ludwigshafen, 2000.

[BLE98] Blessin, B.: Innovation und Innovationsmanagement in kleinen und mittleren Unternehmen. Europäische Forschungsgesellschaft für den Ländlichen Raum, EFLR-Forschung 19998-2, Hohenheim, 1998

[BLU06] Blumenau, J.-C.; Fritz, J. U.: Modellierung und Auswertung in Sekundenschnelle – Kombination analytischer und simulationsbasierter Verfahren. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 96 (2006), Heft 1/2, S. 30-35.

[BOC93] Bock, S.; Meyer, R.: Akzeptanz der Simulationstechnik – Ergebnis einer Umfrage. In: Fortschritte in der Simulationstechnik, Band 6, 8. Symposium, September 1993, Vieweg Verlag, Berlin, S. 95-98.

[BRA05] Braun, A.: Grundlagen der Regelungstechnik - kontinuierliche und diskrete Systeme. Carl Hanser Verlag, München u. a., 2005.

[BRE01] Breithaupt, J.-W. C.: Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen – Grundlagen und Anwendung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 571, Düsseldorf, 2001.

[BRO99] Brockhoff, K.: Forschung und Entwicklung – Planung und Kontrolle. 5. Auflage, R. Oldenbourg Verlag, München, 1999.

[BUL02] Bullinger, H.-J.: Technologiemanagement – Forschen und Arbeiten in einer vernetzten Welt. Springer Verlag, Berlin u. a., 2002.

[BUL84] Bullinger, H.-J.: Einführung in das Technologiemanagement. Teubner Verlag, Stuttgart, 1994.

[COO94] Cooper, R.G.; Kleinschmidt, E. J.: Third-generation new product processes. In: Journal f Product Innovation Management, Jahrgang 11 (1994), pp. 3-14.

[COO02a] Cooper, R.G.; Edgett, S. J.; Kleinschmidt, E. J.: Optimizing the Stage-Gate Process – What Best-Practice Companies do I. In: Industrial Research, (2002) 5, pp. 21-27.

[COO02b] Cooper, R.G.; Edgett, S. J.; Kleinschmidt, E. J.: Optimizing the Stage-Gate Process – What Best-Practice Companies do II. In: Industrial Research, (2002) 6, pp. 43-49.

[DEI06] Deißer, T. A.: Werkzeugkonzepte für aktivgelötete Keramik-Metall-Verbunde. Dissertation Universität Hannover, Schriftenreihe des IW, Band 04/2006, PZH-Verlag, Garbsen 2006

[DEL98] Deloitte & Touche Consulting: Vision in Manfufacturing. Selbsverlag, Düsseldorf, 1998.

[DIE06] Diez, W.: Automobil-Marketing – Navigationssystem für neue Absatzstrategien. 5. Auflage, mi-Fachverlag, Landsberg am Lech, 2006.

[DIN94] Deutsches Institut für Normung e.V.: Regelungstechnik und Steuerungstechnik. 2. Ausgabe, Norm DIN 19226 , Beuth Verlag, Berlin, 1994.

[DIS05] Disselskamp, M.: Innovationsmanagement – Instrumente und Methoden zur Umsetzung im Unternehmen. 1. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden,

2005.

[DIT03] Dittrich, J.; Mertens, P.; Hau, M.; Hufgard, A.: Dispositionsparameter von SAP R/3-PP – Einstellhinweise, Wirkungen, Nebenwirkungen. 3. Auflage, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2003.

[DOH01] Dohms, R.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionsstrukturen. Dissertation der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Shaker Verlag, Aachen, 2001.

[DOM88] Dombrowski, U.: Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 159, Düsseldorf, 1988.

[DOM05] Domschke, W.; Scholl, A.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2005.

[EHR01] Ehrenberg, F.; Schearz, J.: Simulationsgestützte Ablaufplanung der Rohstoffanlieferung eines Stahlunternehmens. In: ZWF, Jahrgang 96 (2001) , Heft 10, S. 554-558.

[EVE97] Eversheim, W.: Prozessorientiertes Qualitätscontrolling – Qualität messbar machen. Springer Verlag, Berlin, 1997.

[EVE98] Eversheim, W.; Schenke, F.-B. Warnke, L.: Komplexität im Unternehmen verringern und beherrschen – Optimale Gestaltung von Produkten und Produktionssystemen. In: Adam, D. (Hrsg.): Komplexitätsmanagement. Schriften zur Unternehmensführung, Band 61, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1998.

[EVE99] Eversheim, W.; Luczak, H.: Produktionsplanung und –steuerung – Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 2 Auflage, Springer Verlag, Berlin 1999.

[EVE02] Eversheim, W.; Hachmöller, K.; Knoche, M.; Walker, R.: Das Technologiemanagement und -controlling von morgen. In: Industriemanagement, 18 (2002) 4, S. 22-25.

[EVE03] Eversheim, W.: Innovationsmanagement für technische Produkte. Springer Verlag, Berlin, 2003.

[FAH02] Fahrmeir, L.; Pigeot, I. u. a.: Statistik – Der Weg zur Datenanalyse. 4. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2002.

[FAS93] Fastabend, H.: Anwendung der Simulation zur Mitarbeiterausbildung in der Fertigungssteuerung. In: Fortschritte in der Simulationstechnik, Band 6, 8. Symposium, September 1993, Vieweg Verlag, Berlin, S. 255-262.

[FER96] Ferk, H.: Geschäfts-Prozessmanagement – ganzheitliche Prozessoptimierung durch die Cost Driver Analyse; Methodik, Implementierung, Erfahrungen. Vahlen Verlag, München, 1996.

[FLE04] Fleischer, J.; Wawerla M.; Nyhuis, P.; Winkler, H.; Liestmann, V.: Proaktive Anlaufsteuerung von Produktionssystemen entlang der Wertschöpfungskette. In: Industrie Management, Jahrgang 20 (2004), Heft 4, S. 29-32.

[FOR81] Ford, D.; Ryan, C.: Taking technology to market. In: HBR, 59 (1981) 2, pp.

117-126.

[FOR83] Ford, D.; Ryan, C.: Die Vermarktung von Technologien. In: Harvard Manager, (1983) 2, S. 22-30.

[FOS82] Foster, R. N.: A call for vision in managing technology. In: Business Week, (1982) 5, pp. 24-27.

[FRA03] Franzke, S.; v. Gleich, C. F.; Mertins, F.; Reinsch, S.: Einsatz der ereignisorientierten Simulation und Möglichkeiten zur Logistikanalyse am Beispiel einer Multi-Ressourcen-Fertigung. In: Baumgarten, H.; Wiendahl, H.-P.; Zentes, J. (Hrsg.): Logistik-Management – Strategien, Konzepte, Praxisbeispiele, Band 1, Springer Verlag, Berlin 2003.

[FÜS97] Füser, K.: Modernes Management – Lean Management, Business Management, Reengineering, Benchmarking und viele Andere Methoden, Dt. Taschenbuch-Verlag, München, 1997.

[GAS05] Gastl, R.: Kontinuierliche Verbesserung im Umweltmanagement – Die KVP-Forderung der ISO 14001 in Theorie und Unternehmenspraxis. Vdf-Verlag, Zürich, 2005.

[GEE04] Geering, H. P.: Regelungstechnik – mathematische Grundlagen, Entwurfsmethoden, Beispiele. 6. Auflage, Springer Verlag, Berlin u. a., 2004.

[GER04] Gerybadze, A.: Technologie- und Innovationsmanagement. Vahlen Handbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften, Vahlen Verlag, München, 2004.

[GER05] Gerpott, T. J.: Strategisches Technologie- und Innovationsmanagement. 2. Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2005.

[GIG99] Gigerenzer, G.; Swijtink, Z.; Porter, Th.: Das Reich des Zufalls – Wissen zwischen Wahrscheinlichkeiten, Häufigkeiten und Unschärfen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1999.

[GOJ06] Gojny, F. H.: Evaluation of the potential of carbon nanotubes as nanostructured modification of (glass-fibre reinforced) epoxy-based composites. Dissertation Universität Hamburg-Harburg, technisch wissenschaftliche Schriftreihe TUHH Polymer Composites 3, Hamburg 2006.

[GUT51] Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Band 1 – die Produktion, Springer Verlag, Berlin, 1951.

[HAM97] Hammer, M.: Das prozessorientierte Unternehmen – die Arbeitswelt nach dem Reengineering. Campus-Verlag, Frankfurt, 1997.

[HAR95] Hartmann, M.: *DYNAPRO* erfolgreich produzieren in turbulenten Märkten. Band I, II, III. Logis Verlag, Stuttgart, 1995.

[HAR05] Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H.: Statistik – Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik. 14. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München 2005

[HAU04] Haupt, R.; Jahn, K.; Lange, M.; Ziegler, W.: Der Patentlebenszyklus – Methodische Lösungsansätze der externen Technologieanalyse. Arbeits- und

Diskussionspapiere der Wirtschaftswissenschaftlichen Fakultät der Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2004.

[HER93] Hering, E.; Triemel, J.; Blank, H.-P.: Qualitätssicherung für Ingenieure. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1993.

[HER04] Herrmann, A. S.: Produktionstechnik für Große CFK-Strukturen. In: Industrie Management, Jahrgang 20 (2004), Heft 6, S. 19-22.

[HÖF92] Höft, U.: Lebenszykluskonzepte – Grundlage für das strategische Marketing- und Technologiemanagement. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1992.

[HOP05] Hoppe, M.: Bestandsoptimierung mit SAP – Effektives Bestandsmanagement mit mySAP ERP und mySAP SCM. Galileo Press, Bonn, 2005.

[HOP07] Hoppe, M.: Sales and inventory planning with SAP APO. Galileo Press, Bonn, Boston, 2007.

[HOP08] Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: Factory Physics – foundations of manufacturing management. 3. Auflage, McGraw-Hill Higher Education, 2008.

[HOU02] Housein, G.; Lin, B.; Wiesinger, G.: Der Mitarbeiter im Fokus des Produktionsanlaufs – Management von Wissen, Qualifikation und Beziehungen als Garant für einen schnellen Produktionsanlauf. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 92 (2002), Heft 10, S. 509-513.

[HUS03] Hustedt, P.: Modular aufgebaute Vorformwerkzeuge für das Schmieden von Langteilen. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, VDI Verlag, Düsseldorf, 2003.

[INA05] INA Schaeffler KG: Bessere Chancen bei Neuplanung und Restrukturierung kompletter Werke. In: ZWF Sonderpublikation Digitale Fabrik (2005), S. 43-47.

[JAC06] Jacobsen, A. E.: Messung und Bewertung von Nachfragedynamik und logistischer Agilität in der Automobilzulieferindustrie. Dissertation Universität Hannover, Berichte aus dem IFA, Band 03/2006, PZH Verlag, Hannover, 2006.

[JÄG00] Jäger, M.: Kennliniengestützte Parametereinstellung von PPS-Systemen. Dissertation Universität Hannover, 2000.

[KAM04] Kamiske, G. F.: Prozessoptimierung mit Quality Engineering. Carl Hanser Verlag, München u. a., 2004.

[KER02] Kerner, A.: Modellbasierte Beurteilung der Logistikleistung von Prozessketten. Dissertation, Universität Hannover, 2002.

[KLE03] Kleppmann, W.: taschenbuch Versuchsplanung – Produkte und Prozesse optimieren. 3. Auflage, hanser fachbuchverlag, 2003.

[KLE04] Klein, B.: Versuchsplanung DoE – Einführung in die Taguchi/ Shainin Methodik. Oldenbourg Verlag, München, 2004.

[KOR02] Korek, H.; Conrad-Schaller, A.: Vollautomatische Schmiedelinie für Kurbelwellen in 7,5 Sekunden-Takt. In: Forum technische Mitteilungen ThyssenK-

rupp. Heft 1, 2002, S. 23-27.

[KRU82] Krubasik, E. G.: Strategische Waffe. In: Wiwo, (1982) 25, S. 28-33.

[KUH02] Kuhn, A.; Wiendahl, H.-P.; Eversheim, W.; Schuh, G.: Schneller Produktionsanlauf von Serienprodukten. Ergebnisbericht der Untersuchung "fast ramp-up", Verlag Praxiswissen, Dortmund, 2002.

[KUH03] Kuhn, A.; Rabe, M.: Simulationseinsatz in der Logistik. In: Baumgarten, H.; Wiendahl, H.-P.; Zentes, J. (Hrsg.): Logistik-Management – Strategien, Konzepte, Praxisbeispiele, Band 1, Springer Verlag, Berlin 2003.

[LIT86] Little, A. D. (Hrsg.): Management im Zeitalter der strategischen Führung. 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1986.

[LIT87] Little, A. D. (Hrsg.): Management der Geschäfte von morgen. 2. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 1987.

[LÖD05] Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung – Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. Springer Verlag, Berlin u. a., 2005.

[LOP05] Lopitzsch, J. R.: segmentierte Adaptive Fertigungssteuerung. Dissertation Universität Hannover, Berichte aus dem IFA, Band 03/2005, PZH Verlag, Hannover, 2005.

[LUT02] Lutz, S.: Kennliniengestütztes Lagermanagement. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 13, Nr. 53, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002.

[MAR93] Marr, R.: Innovationsmanagement. In: Wittmann, W. (Hrsg.), Handwörterbuch der Betriebswirtschaft, 5. Auflage, Poeschel Verlag, Stuttgart, 1993.

[MEI05] Meinhardt, I.; Sunarjo, F.; Marquardt, H.-G.: Bestimmung des stochastischen Zeitverhaltens in Supply Chains. In: Logistics-Journal, (2005) Ausgabe November. http://www.elogistics-journal.de/uploads/media/zeitverhalten.pdf , (Datum des letzten Zugriffs: 02.02.2008).

[MER98] Mertins, K.; Rabe, M. (Hrsg.): Erfahrungen aus der Zukunft. 8. ASIM-Fachtagung, Simulation in Produktion und Logistik, IPK Eigenverlag, Berlin, 1998.

[MER05] Mertens, P.; Rässler, S.: Prognoserechnung. 6. Auflage, Physica Verlag, Heidelberg, 2005.

[MÖH05] Möhrle, M. G.; Isenmann, R.: Technologie-Roadmapping – Zukunftsstrategien für Technologieunternehmen. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin u. a., 2005.

[MOL07] Mollenhauer, K.; Tschöke, H.: Handbuch Dieselmotoren. 3. neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin u. a., 2007.

[MÜL98] Müller, M.: Qualitätscontrolling komplexer Serienprodukte. Dissertation der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Berichte aus der Produktionstechnik, Band 8/98, Shaker Verlag, Aachen, 1997.

[NOF06] Nofen, D.: Regelkreisbasierte Wandlungsprozesse der modularen Fabrik. Dissertation Universität Hannover, Berichte aus dem IFA, Band 01/2006, PZH Verlag, Hannover, 2004.

[NRC87] National Research Council: Management of Technology – The Hidden Competitive Advantage. National Academy Press, Washington D.C., 1987.

[NYH91] Nyhuis, P.: Durchlauforientierte Losgrößenbestimmung. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften, Reihe 2, Nr. 225, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991.

[NYH03] Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien – Grundlagen, Werkzeuge and Anwendungen. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2003.

[NYH04] Nyhuis, P.; Fischer, A.; Vogel, M.: Modelling and Controlling the Schedule Reliability of Work Systems by the Use of a Logistic Operating Curve. In: Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing, 4-6 Februar 2004, Stellenbosch, Südafrika, pp. 481-487.

[NYH05] Nyhuis, P.; Heins, M.; Großhennig, P. u. a.: Simulationsgestützte Wirkbeziehungsanalyse im Produktionsanlauf. In: ZWF (2005) Heft 12, Carl Hanser Verlag, München, 2005, S. 746-751

[OST96] Osterloh, M.; Frost, J.: Prozessmanagement als Kernkompetenz – wie Sie Business Reengineering strategisch nutzen können. Gabler Verlag, Wiesbaden, 1996.

[OUA04] Ouali, K.; Reinsch, S.; Wiendahl, H.-P.: Multidimensional Logistic Performance Controlling of Precision Forging Processes. In: Production Engineering, Vol. XI/1 (2004), Ausgabe X/1, Braunschweig (Annals of the WGP), pp. 119-124.

[OUA04a] Ouali, K.; Reinsch, S.: Logistic Performance Controlling – Assessment and Continuous Improvement of Processes Applied on an Example of a Forging Process. In: Proceedings of the International Conference on Competitive Manufacturing COMA '04, Progress in Innovative Manufacturing, 04-06. Februar, Stellenbosch, Südafrika, 2004.

[OUA05] Ouali, K.; Wiendahl, H.-P.; Reinsch, S.: Simulationsgestützte Planung und -Steuerung von Lieferketten. In wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 95 (2005), Heft 4, S. 242-247.

[PEN96] Penz, T.: Wechselwirkungen technischer und logistischer Produktionsprozesse und ihre Auswirkungen auf das Qualitätsmanagement. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 232, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1996.

[PFE91] Pfeiffer, W.: Technologie- Portfolio zum Management strategischer Zukunftsgeschäftsfelder. 6. Auflage, Vandenhoeck und Ruprecht Verlag, Göttingen, 1991.

[PFE01] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement : Strategien, Methoden, Techniken. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München u. a., 2001.

[PFO00] Pfohl, H.-C.: Logistiksysteme – Betriebswirtschaftliche Grundlagen. 6. Auf-

lage, Springer Verlag, Berlin, 2000.

[PIC00] Pichler, J.H. u. a. (Hrsg.): Management in KMU – Die Führung von Klein- und Mittelunternehmen, 3. Auflage, Haupt Verlag, Bern, 2000.

[PLE96] Pleschak, F.; Sabisch, H.: Innovationsmanagement. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1996.

[PUH99] Puhl, H.: Komplexitätsmanagement – ein Konzept zur ganzheitlichen Erfassung, Planung und Regelung der Komplexität in Unternehmensprozessen. Dissertation Universität Kaiserslautern, Produktionstechnische Berichte, Band 31, ZBT-Abteilung Foto-Repro-Druck der Universität Kaiserslautern, 1999.

[QIA02] Qian, Y: Strategisches Technologiemanagement im Maschinenbau – Erfolgsfaktoren chinesischer Maschinenbauunternehmen im Kompetenzbasierten Wettbewerb. Dissertation Universität Stuttgart, 2002.

[QUE92] Quentin, H.: Grundzüge, Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen der Shainin-Methoden, Teil 2. In: Qualität und Zuverlässigkeit, Jahrgang 37 (1992) 7, S. 416 ff.

[RAM97] Ramming, F. J.; Steinmüller, B.: CE – Enabling Technologies. In: Medhat, S. (Hrsg.), Concurrent Engineering – the Agenda for Success. Research Studies Press, Taunton (UK), 1997.

[REI97] Reinhart, G.; Feldmann, K.: Simulation - Schlüsseltechnologie der Zukunft? Stand und Perspektiven. Herbert Utz Verlag, München, 1997.

[REI04] Reinsch, S.: Kennzahlenbasierte Positionierung der Logistik von Lieferketten. Dissertation Universität Hannover, Berichte aus dem IFA, Band 03/2004, PZH Verlag, Hannover, 2004.

[REI05] Reichmann, T.: Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten – Grundlagen einer systemgestützten Controlling-Konzeption. 7. Auflage, Vahlen Verlag, München, 2005.

[REN04] Renz, K.-C.: Technologiemanagement in wachsenden und schnell wachsenden Unternehmen. Dissertation Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2004.

[RET03] Rethmeier, M.: MIG-Schweißen von Magnesiumlegierungen. Dissertation Universität Braunschweig, Forschungsberichte des Instituts für Schweißtechnik, Reihe 7, Shaker Verlag, Aachen, 2003.

[RIN99] Rinne, H.; Mittag, H.-J.: Prozessfähigkeitsmessung für die industrielle Praxis. Hanser Verlag, München, 1999.

[RIS02] Risse, J.: Time-to-Market-Management in der Automobilindustrie. Dissertation Universität Berlin, 2002.

[RIS03] Risse, J.: Zeitorientierte Produktentstehung – Ansatzpunkte und Methoden für das Time-to-Market-Management. In: Baumgarten, H.; Wiendahl, H.-P.; Zentes, J. (Hrsg.), Logistik Management, Band 2, Springer Verlag, Berlin u. a., 2003.

[RUD00] Rudau, E.: Deutsche Gesenkschmiedeindustrie gerüstet für die Zukunft. In: Schmiede-Journal, (2000) 9, S. 32-33.

[RUS07] Rushton, A.; Walker, S.: International logistics and supply chain outsourcing – from local to global. Kogan page, London, 2007.

[SCH97] Schuh, G.; Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Komplexität und Agilität – Steckt die Produktion in der Sackgasse? Springer Verlag, Berlin u. a., 1997.

[SCH97a] Schmidt, G.: Prozessmanagement – Modelle und Methoden. Springer Verlag, Berlin, 1997.

[SCH01] Schwarz, S.: Sensitivitätsanalyse und Optimierung bei nichtlinearem Strukturverhalten. Dissertation Universität Stuttgart, Berichte Institut für Baustatik, Nr. 34, Stuttgart, 2001.

[SCH02] Schulze, T.; Schlechtweg, S.; Hinz, V. (Hrsg.): Simulation und Visualisierung 2002. Tagungsband der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, März, 2002.

[SCH04] Schweitzer, M.: Globalisierung als Innovation. In: Schwarz, E. J. (Hrsg.), Nachhaltiges Innovationsmanagement, 1. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2004.

[SCH04a] Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.; Kruse, A.; König, F.: Hybrides Änderungsmanagement im Serienanlauf. In: Industrie Management, Jahrgang 20 (2004), Heft 4, S. 21-24.

[SCH04b] Schuh, G.; Franzkoch, B.: Fast Ramp-Up – Anlaufstrategien, Deviationsmanagement und Wissensmanagement für den Anlauf. In: Zeit gewinnen durch flexible Strukturen, Tagungsband, Leipzig 22.-23. September 2004, VDI-Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik, VDI-Berichte Nr. 1849, S. 69-79.

[SCH05a] Schröder, W.: Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit durch Erhöhung der Fertigung. In Schmiede-Journal, (2005) 9, S. 22-23.

[SCH05b] Schuh, G.; Kampker, A.; Franzkoch, B.: Anlaufmanagement – Kosten senken, Anlaufzeit verkürzen, Qualität sichern. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 95 (2005), Heft 5, S. 405-409.

[SCH06a] Schuh, G.; Gierth, A.: Produktionsplanung und -steuerung – Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2006.

[SCH06b] Scholz-Reiter, B.; Krohne, F.; Nyhuis, P. u. a.: Prozessänderungen – Engpassorientierte Realisierung von Anlaufzielgrößen. In: Industrie Management, Jahrgang 22 (2006), Heft 6, S. 15-18.

[SEI97] Seiffert, H.; Radnitzky, G. (Hrsg.): Wörterbuch der wissenschaftstheoretischen Terminologie. Original Ausgabe, Band 4, Beck Verlag, Berlin, 1997.

[SEI06] Seidl, I.: Untersuchungen zum "Semi-Solid Rheoschmieden" zur Formgebung von Stählen im thixotropen Zustand. Dissertation Universität Aachen, Shaker Verlag, Aachen 2006.

[SPA03] Spath, D.; Fleischer, J.; Lanza, G.: Qualitätssimulation im Serienanlauf –

Vorbestimmte Qualitätskurven von Elementarprozessen. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 93 (2003), Heft 1/2, S. 50-54.

[SPE96] Specht, G.; Beckmann, C.: F&E-Management. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1996.

[SPE02] Specht, D.; Möhrle, M. G. (Hrsg.): Gabler Lexikon Technologie Management – Management von Innovationen und neuen Technologien im Unternehmen. 1. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2002.

[SPE06] Specker, A.; Dähndel, H.; Schäfer, F.: Hochgenaue Gratfreie Massivumformung. In: Umformtechnik, Ausgabe 1 (2006) Heft 3, Seite 40-42.

[SPI03] Spieckermann, S.; Bierwirth, T.: Schnelle Analyse und Optimierung von Fertigungslinien. In: VDI-Z Integrierte Produktion, 145 (2003) 3, S. 22 – 24.

[SPR07] Spreen, W. E.: Marketing in the international aerospace industry. Ashgate Verlag, Aldershot, 2007.

[SPU98] Spur, G.: Technologie und Management – zum Selbstverständnis der Technikwissenschaft. Hanser Verlag, München, 1998.

[STE04] Steland, A.: Mathematische Grundlagen der empirischen Forschung – Statistik und ihre Anwendungen. Springer Verlag, München, 2004.

[STO07] Storm, R.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. 12. Auflage, Fachbuchverlag, Leipzig, 2007.

[STR03] Strebel, H.: Klein- und Mittelunternehmen in Technologie- und Innovationsnetzwerken. In Schwarz, E. J. (Hrsg.), Technologieorientiertes Innovationsmanagement – Strategien für kleine und mittelständische Unternehmen, 1. Auflage, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2003.

[STU03a] Sturm, R.: Materialflussautomatisierung in der Mikrochipfertigung – Simulationsbasierte Robustheitsanalyse der Transport- und Lagerautomatisierung. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 93 (2003), Heft 3 S. 157-163.

[STU03b] Sturm, R.: Simulation-based Evaluation of the Ramp-up Behavior of Waferfabs. In: Proceedings of IEEE/SEMI Advanced Semiconductor Manufacturing Conference and Workshop, München, 2003, S. 111-117.

[SYS90] Syska, A.: Kennzahlen für die Logistik – Entwicklung einer Vorgehensweise zur Bildung von betriebsspezifischen Logistikkennzahlensystemen. Springer Verlag, Heidelberg, 1990.

[TEM08] Tempelmeier, H.: Material-Logistik – Modelle und Algorithmen für die Produktionsplanung und -steuerung in Advanced Planning-Systemen. 7. Aufl., Springer Verlag, Berlin, 2008.

[TES03] Tesche, N.: Probleme bei der Implementierung von PPS-Systemen. Josef Eul Verlag, Köln, 2003.

[THO03] Thom, N. (Hrsg.): Fälle zu Organisation und Personal – Didaktik, Fallstudien, Lösungen, Theoriebausteine. 4. Auflage, Haupt Verlag, Bern, 2003.

[TÖN06] Tönshoff, H. K.; Siegbert, J.: Simulation Based Production Control for Die and Mold Manufacturing. In: Production Engineering, Research and Devel-

opment, Band 13 (2006) Volume 1, pp. 135-138.

[TSC98] Tschirky, H.: Technologie-Management – Schließung der Lücke zwischen Management-Theorie und Technologie-Realität. In: Tschirky, H.; Koruna, S. (Hrsg.), Technologiemanagement – Idee und Praxis, Orell Füssli Verlag, Zürich, 1998.

[ULR04] Ulrich, K., Eppinger, S. D.: Product design and development. 3. Auflage, McGraw-Hill, Boston, 2004.

[URB04] Urban, G., S.r, M.: Fragestellungen zum Produktionsanlauf. In: Industrie Management, Jahrgang 20 (2004), Heft 4, S. 57-59.

[VAH05] Vahs, S.; Burmester, R.: Innovationsmanagement – von der Produktidee zur erfolgreichen Vermarktung. 3. Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2005.

[VDI97] VDI Gesellschaft Fördertechnik Materialfluss Logistik (Hrsg.): Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen. VDI-Richtlinie 3633, Blatt 5, Beuth Verlag, Düsseldorf, 1997.

[VDI00] VDI Richtlinie 4400, Blatt 1: Logistikkennzahlen für die Beschaffung; Blatt 2: Logistikkennzahlen für die Produktion; Blatt 3: Logistikkennzahlen für die Distribution. Beuth Verlag, Düsseldorf, 2000.

[VIE98] Vieregge, K.: Die deutsche Schmiedeindustrie im Wettbewerb. In: Fortschritt mit Schmiedeteilen 98, VDI-Berichte, (1998) 1382, S. 1-11.

[VOL04] Vollersten, F.; Wagner, F.; Seefeld, T.: Neue Entwicklungen und Trends im Bereich des Laserfügens. In: Industrie Management, Jahrgang 20 (2004), Heft 6, S. 11-14.

[WAN07] Wannenwetsch, H.: Integrierte Materialwirtschaft und Logistik : Beschaffung, Logistik, Materialwirtschaft und Produktion. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin 2007.

[WAR94] Warnecke, H.-J.; Becker, B.-D.: Strategien für die Produktion - Standortsicherung im 21. Jahrhundert. Raabe Verlag, Stuttgart, 1994.

[WAR02] Warnecke, H.-J.; Dangelmaier, W.: Fertigungslenkung – Planung und Steuerung des Ablaufs der diskreten Fertigung. Springer Verlag, Berlin 2002.

[WEB02] Weber, J.: Logistik und Supply Chain Controlling. 5. Auflage, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 2002.

[WEB07] Weber, Ch.: Integrierte Losgrößen- und Reihenfolgeplanung. GRIN Verlag, München 2007.

[WEL02] Welpe, I.; Dowling, M.: Strategie Technologiemanagement. EXIST High-TEPP, Universität Regensburg, Ein Programm des Bundesministeriums für Bildung und Forschung, Martinsried, 2002.

[WES06] Westkämper, E.: Wandlungsfähigkeit in der industriellen Produktion. CTW Transfer-Centrum für Produktionslogistik und Technologiemanagement, München, 2006.

[WIE91] Wiendahl, H.-P.(Hrsg.): Anwendung der belastungsorientierten Fertigungssteuerung. Carl Hanser Verlag, München, 1991.

[WIE93] Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.: Die logistische Betriebskennlinie – ein neuer Ansatz zur Beherrschung der Produktionslogistik. In RKW (Hrsg.), RKW – Handbuch Logistik, 19. Lfg XI/93, Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1993.

[WIE97] Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung – Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. Carl Hanser Verlag, München u. a., 1997.

[WIE98] Wiendahl, H.-P.; Ruta, A.: Einsatz eines Monitoringsystems in Schmiedeunternehmen. In: Schmiedejournal, (1998) Heft 9; S. 39-40.

[WIE00] Wiegand, M.: Vom Zeitmechanismus bis zur Anlagensteuerung – Objektorientierte Modellierungsansätze für die Materialflusssimulation. Dissertation Universität Kassel. Kassel university press, Kassel, 2000.

[WIE02] Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Logistikqualität – Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin u. a., 2002.

[WIE02a] Wiendahl, H.-P.; Schneider, M.: Modelling and Controlling the Logistic Performance of Manufacturing Departments by the Use of Logistic Process Operating Curves (LPOCs). In: Proceedings of the 35th CIRP, International Seminar on Manufacturing Systems, 13-15 Mai 2002, Seoul, Südkorea, pp. 119-122.

[WIE02b] Wiendahl, H.-H.: Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld. Dissertation Universität Stuttgart, Reihe IPA-IAO Forschung und Praxis, Nr. 358, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2002.

[WIE02c] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.; Winkler, H.: Anlaufrobuste Produktionssysteme. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 92 (2002), Heft 11/12, S. 650-655.

[WIE02d] Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit – Schlüsselbegriff der zukunfsfähigen Fabrik. In: wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 92 (2002), Heft 4, S. 122-127.

[WIE03] Wiendahl, H.-P.: Die klassischen Stolpersteine der PPS und wie sie vermieden werden. In: Maßanzug PPS, IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover und Fraunhofer Institut Produktionstechnik und Automatisierung, Hannover, 09. Mai, 2003.

[WIE04] Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Mertins, F.: Assistent für die Logistik-Simulation. In: ZWF, Jahrgang 99 (2004) , Heft 1/2, S. 29-35.

[WIE05] Wiendahl, H.-P.; Nofen, D.; Klußmann, J. H.; Breitenbach, F. (Hrsg.): Planung modularer Fabriken – Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. Carl Hanser Verlag, München u. a., 2005.

[WIE05a] Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 5. Auflage, Carl Hanser Verlag, München u. a., 2005.

[WIE05b] Wiendahl, H.-P.; Reinsch, S., Ouali, K.: Simulation based Planning and Control of Supply Chains. In: Proceedings of IFIP 5.7, Advances in Production Management Systems, 18-21 September, Rockville MD, USA, 2005.

[WIE06] Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld. In: wt Werkstattstechnik, Jahrgang 96 (2006) Heft 4, S. 183-189.

[WIL96] Wildemann, H. (Hrsg.): Controlling im TQM – Methoden und Instrumente zur Verbesserung der Unternehmensqualität. Springer Verlag, Berlin, 1996.

[WIL04] Wildemann, H.: Präventive Handlungsstrategien für den Produktionsanlauf. In: Industrie Management, Jahrgang 20 (2004), Heft 4, S. 17-20.

[WIL04a] Wildemann, H.: Logistik-Check – Instrumente zur Bewertung des Logistikpotenzials von Unternehmen. 2. Auflage, TCW-Verlag, München, 2004.

[WIL07] Wildemann, H.: Kernkompetenzen – Leitfaden zur Optimierung der Leistungstiefe in Entwicklung, Produktion und Logistik. 12. Auflage, TCW Transfer-Centrum für Produktionslogistik und Technologiemanagement, München, 2007.

[WIT96a] Witt, J.: Grundlagen für die Entwicklung und die Vermarktung neuer Produkte. In: Witt, J. (Hrsg.), Produktinnovation, Vahlen Verlag, München, 1996.

[WIT96b] Witt, J.: Produktinnovation – Entwicklung und Vermarktung neuer Produkte. Vahlen Verlag, München, 1996

[WIT01] Witt, J.: Produktinnovation – Strategische Planung und Entwicklung der Produkte von morgen. Hanser Verlag, München, 2001.

[WOL04] Wolf, A.: Thixo-Schmieden von Al-Mg-Si Legierungen. In: Siegert, K. (Hrsg), Beiträge zur Umformtechnik Nr. 43, MAT-INFO Werkstoff Informationsgesellschaft, Frankfurt/M. 2004.

[WOL95] Wolfrum, B.: Alternative Technologiestrategien. In: Zahn, E. (Hrsg.), Handbuch Technologiemanagement. Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1995.

[WOR06] Wortmann, D.: Dynamische Simulationsmodelle verbinden Produktions- und Logistikprozesse. In: ZWF, Jahrgang 101 (2006) , Heft 1/2, S. 77-80.

[YU01] Yu, K.-W.: Terminkennlinie : eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Dissertation Universität Hannover, Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 576, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2001.

[ZAH95] Zahn, E.: Gegenstand und Zweck des Technologiemanagements. In: Zahn, E. (Hrsg.), Handbuch Technologiemanagement, Schäffer-Poeschel Verlag, Stuttgart, 1995.

[ZIN00] Zinser, S.: Eine Vorgehensweise zur szenariobasierten Frühnavigation im strategischen Technologiemanagement. Dissertation Universität Stuttgart, IPA-IAO Forschung und Praxis, Jost-Jetter Verlag, Heimsheim, 2000.

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name	Karim Ouali
Geburtsdatum und -ort	19.10.1976 in Reims/Frankreich
Familienstand	verheiratet

Schulbildung

10/82 - 06/88	Grundschule Hammamet (Tunesien)
09/88 - 06/95	Elitengymnasium „English Pioneer School of Ariana“ in Ariana (Tunesien)
	Schulabschluss: technisches Abitur

Studium

09/95 - 06/96	Niedersächsisches Studienkolleg für ausländische Studierende Hannover
10/96 - 02/02	Studium des Maschinenbaus an der Universität Hannover, Vertiefungsrichtung Produktionstechnik
	Studienabschluss: Diplom Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Berufstätigkeit

01/98 - 12/01	Wissenschaftliche Hilfskraft am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH, IQ - Institut für Qualitätssicherung (Universität Hannover) sowie am IFW - Institut für Fertigung und Spanende Werkzeugmaschinen (Universität Hannover)
11/00 - 02/01	Interdisziplinäres Hauptpraktikum bei DaimlerChrysler AG in Stuttgart, Bereich Qualitätsmanagement
04/02 - 07/06	Wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Logistik am IPH - Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH
09/06 -12/08	Airbus Deutschland GmbH in Hamburg, Abteilung Supply Chain and Quality
Seit 01/09	Airbus Deutschland GmbH in Hamburg, Abteilung Customer Guidance and Version Management